



العلوم الحياتية

الصف الثاني عشر - كتاب الطالب

الفصل الدراسي الأول

12





العلوم الحياتية

الصف الثاني عشر - كتاب الطالب

الفصل الدراسي الأول

12

فريق التأليف

موسى عطا الله الطراونة (رئيسًا)

د. أحمد محمد الجعافرة   عطاف جمعة المالكي

روناهي "محمد صالح" الكردي (منسقًا)

الناشر: المركز الوطني لتطوير المناهج




06-5376262 / 237   06-5376266   P.O.Box: 2088 Amman 11941

@nccdjor   feedback@nccd.gov.jo   www.nccd.gov.jo

قـرّرت وزارة التربيـة والتعليـم تدريـس هذا الكتـاب في مدارس المملكـة الأردنية الهاشـمية جميعها، بنـاءً على قـرار المجلس الأعلى للمركز الوطني لتطـــوير المناهـــج في جلسـته رقم (2022/3)، تاريـخ 2022/5/12 م، وقرار مجلس التربية والتعليـم رقم (2022/22)، تاريـخ 2022/5/29 م، بـدءًا من العام الـدراسي 2022 / 2023 م.

- Prepared Originally in English for the National Center for Curriculum Development. Amman - Jordan
- Translated to Arabic, adapted, customised and published by the National Center for Curriculum Development. Amman - Jordan

ISBN: 978 - 9923 - 41 - 312 - 8

المملكة الأردنية الهاشمية
رقم الإيداع لدى دائرة المكتبة الوطنية
(2022/4/1977)

375,001

الأردنّ. المركز الوطني لتطوير المناهج

العلـوم الحياتيـة: الصـف الثانـي عشـر، الفـرع العلمي: كتـاب الطالـب (الفصـل الدراسـي الأول)/ المركـز الوطنـي لتطوير المناهـج.- عمّـان: المركـز، 2022

ج1 (110) ص.

ر.إ.: 2022/4/1977

الواصفات: / تطوير المناهج/ / المقررات الدراسية/ / مستويات التعليم/ / المناهج/

يتحمل المؤلف كامل المسؤولية القانونية عن محتوى مصنفه ولا يعبّر هذا المصنف عن رأي دائرة المكتبة الوطنية.

British Library Cataloguing -in- Publication Data
A catalogue record for this publication is available from the Library.

الطبعة الأولى (التجريبية)

1443 هـ / 2022 م

قائمة المحتويات

المقدمة 5

الوحدة الأولى: كيمياء الحياة 7

تجربة استهلالية: الكشف عن وجود الكربون في المُركَّبات العضوية 9

الدرس 1: المُركَّبات العضوية الحيوية 10

الدرس 2: الإنزيمات وجزيء حفظ الطاقة ATP 30

الدرس 3: التفاعلات الكيميائية في الخلية 39

الإثراء والتوسُّع: البكتيريا والطاقة 57

مراجعة الوحدة 58

الوحدة الثانية: دورة الخلية وتصنيع البروتينات 63

تجربة استهلالية: الانقسام المتساوي في خلايا القمم النامية لجذور الثوم 65

الدرس 1: دورة الخلية 66

الدرس 2: الانقسام الخلوي وأهميته 73

الدرس 3: تضاعف DNA والتعبير الجيني 84

الإثراء والتوسُّع: التيلوميرات Telomeres 97

مراجعة الوحدة 98

مسرد المصطلحات 103

قائمة المراجع 108

المواقع الإلكترونية 109

بسم الله الرحمن الرحيم

المقدمة

انطلاقًا من إيمان المملكة الأردنية الهاشمية الراسخ بأهمية تنمية قدرات الإنسان الأردني، وتسليحه بالعلم والمعرفة؛ سعى المركز الوطني لتطوير المناهج، بالتعاون مع وزارة التربية والتعليم، إلى تحديث المناهج الدراسية وتطويرها، لتكون مُعينًا للطلبة على الارتقاء بمستواهم المعرفي، ومجاراة أقرانهم في الدول المتقدمة.

يُعَدُّ هذا الكتاب واحدًا من سلسلة كتب المباحث العلمية التي تُعْنى بتنمية المفاهيم العلمية، ومهارات التفكير وحَلِّ المشكلات، ودمج المفاهيم الحياتية والمفاهيم العابرة للمواد الدراسية، والإفادة من الخبرات الوطنية في عمليات الإعداد والتأليف وَفق أفضل الطرائق المُتَّبَعة عالميًّا؛ لضمان انسجامها مع القيم الوطنية الراسخة، وتلبيتها لحاجات أبنائنا الطلبة والمعلِّمين والمعلِّمات.

جاء هذا الكتاب مُحقِّقًا لمضامين الإطار العام والإطار الخاص للعلوم، ومعاييرها، ومُؤشِّرات أدائها المُتمثِّلة في إعداد جيل محيط بمهارات القرن الواحد والعشرين، وقادر على مواجهة التحديات، ومُعتَزٍّ -في الوقت نفسه- بانتمائه الوطني. وتأسيسًا على ذلك، فقد اعتُمِدت دورة التعلُّم الخماسية المنبثقة من النظرية البنائية التي تمنح الطالب الدور الأكبر في العملية التعلُّمية التعليمية، وتُوفِّر له فرصًا عديدةً للاستقصاء، وحَلِّ المشكلات، واستخدام التكنولوجيا وعمليات العلم، فضلًا عن اعتماد منحى STEAM في التعليم الذي يُستعمَل لدمج العلوم والتكنولوجيا والهندسة والفن والعلوم الإنسانية والرياضيات في أنشطة الكتاب المتنوعة.

يتألَّف الكتاب من وحدتين، يَتَّسِمُ محتواهما بالتنوع في أساليب العرض، هما: كيمياء الحياة، ودورة الخلية وتصنيع البروتينات. يضم الكتاب أيضًا العديد من الرسوم، والصور، والأشكال التوضيحية، والأنشطة، والتجارب العملية التي تُنمّي مهارات العمل المخبري، وتساعد الطلبة على اكتساب مهارات العلم، مثل: الملاحظة العلمية، والاستقصاء، ووضع الفرضيات، وتحليل البيانات، والاستنتاج القائم على التجربة العلمية المضبوطة، وصولًا إلى المعرفة التي تُعِين الطلبة على فهم ظواهر الحياة من حولنا.

روعي في تأليف الكتاب التركيز على مهارات التواصل مع الآخرين، ولا سيَّما احترام الرأي والرأي الآخر، وتحفيز الطلبة على البحث في مصادر المعرفة المختلفة؛ فلغة الكتاب تُشجِّع الطالب أنْ يتفاعل مع المادة العلمية، وتحثُّه على بذل مزيد من البحث والاستقصاء. وقد تضمَّن الكتاب أسئلة متنوعة تراعي الفروق الفردية، وتُنمّي لدى الطلبة مهارات التفكير وحَلِّ المشكلات.

أُلحِقَ بالكتاب كتابٌ للأنشطة والتجارب العملية، يحتوي على جميع التجارب والأنشطة الواردة في كتاب الطالب؛ لتساعده على تنفيذها بسهولة، إضافةً إلى أسئلة مثيرة للتفكير.

ونحن إذ نُقدِّمُ الطبعة الأولى (التجريبية) من هذا الكتاب، فإنّا نأمل أنْ يُسهِم في تحقيق الأهداف والغايات النهائية المنشودة لبناء شخصية الطالب، وتنمية اتجاهـات حُبِّ التعلُّم ومهارات التعلُّم المستمر لديه، فضلًا عن تحسين الكتاب؛ بإضافة الجديد إلى المحتوى، وإثراء أنشطته المتنوعة، والأخذ بملاحظات المعلِّمين والمعلِّمات.

والله ولي التوفيق

المركز الوطني لتطوير المناهج



الوحدة 1

كيمياء الحياة
Chemistry of Life

قال تعالى:

﴿ فَلْيَنظُرِ ٱلْإِنسَٰنُ مِمَّ خُلِقَ ﴾ (سورة الطارق، الآية 5).

أتأمَّل الصورة

تدخل المُركَّبات العضوية الحيوية في تركيب أجسام الكائنات الحيَّة، وهي مُركَّبات تُسهِم إسهامًا فاعلًا في العمليات الحيوية اللازمة لاستمرار الحياة، وتُمثِّل الصورة في الأعلى إنزيم إنتاج جزيء حفظ الطاقة ATP في الغشاء الداخلي للميتوكندريا. فمِمَّ تتكوَّن الأجزاء الظاهرة في هذه الصورة؟ ما أهميتها في حياة الكائنات الحيَّة؟



الفكرة العامة:

تدخل المُركَّبات العضوية الحيوية في تركيب أجسام الكائنات الحيَّة، ويُعَدُّ وجودها ضروريًّا للتفاعلات الكيميائية التي تحدث في خلايا الكائنات الحيَّة، وينتج من هذه التفاعلات تغيُّرات في المادة والطاقة.

الدرس الأوَّل: المُركَّبات العضوية الحيوية.

الفكرة الرئيسة: تحتوي أجسام الكائنات الحيَّة على أربعة أنواع رئيسة من المُركَّبات العضوية الحيوية، هي: الكربوهيدرات، والبروتينات، والليبيدات، والحموض النووية. ولكلٍّ من هذه الأنواع دور حيوي في أجسام الكائنات الحيَّة.

الدرس الثاني: الإنزيمات وجزيء حفظ الطاقة ATP.

الفكرة الرئيسة: للإنزيمات دور مهم في تحفيز التفاعلات الكيميائية وتسريعها، ولجزيء حفظ الطاقة ATP أيضًا دور في بعض التفاعلات التي تُحفِّزها الإنزيمات.

الدرس الثالث: التفاعلات الكيميائية في الخلية.

الفكرة الرئيسة: تحدث داخل الخلايا المُكوِّنة لأجسام الكائنات الحيَّة تفاعلات كيميائية عِدَّة، منها ما يُخزِّن الطاقة في الروابط الكيميائية داخل المُركَّبات العضوية، ومنها ما يُحرِّر الطاقة المُخزَّنة اللازمة لأداء الأنشطة الحيوية.

تجربة استهلالية

الكشف عن وجود الكربون في المُركَّبات العضوية

الكربون عنصر مهم يدخل في تركيب المُركَّبات العضوية جميعها، ويُمكِن الكشف عنه في المادة العضوية عن طريق تسخينها مع أكسيد النحاس؛ إذ يتأكسد الكربون (إنْ وُجِد)، وينتج غاز ثاني أكسيد الكربون CO_2 الذي يتفاعل مع ماء الجير (محلول هيدروكسيد الكالسيوم)، مُسبِّبًا تعكُّره وتكدُّره.

المواد والأدوات:

كأسان زجاجيتان تحوي كلٌّ منهما mL (4) من ماء الجير الرائق، سُكَّر مائدة، ملح طعام، أكسيد النحاس، أنبوبا اختبار سعة كلٍّ منهما mL (10)، حاملا أنابيب اختبار، سِدادتا أنابيب اختبار مطّاطيتان مثقوبتان من المنتصف، أنبوبا وصل زجاجيان رفيعان على شكل حرف L، مصدرا حرارة (موقدا بنسن)، ميزان ، منصب.

إرشادات السلامة: استعمال مصدر الحرارة والأنابيب الساخنة بحذر.

ملحوظة: يُحضَّر ماء الجير الرائق بإذابة هيدروكسيد الكالسيوم في ماء مُقطَّر حتى الإشباع، ثم تصفيته.

خطوات العمل:

1. **أقيس:** أَزِن g (2) من سُكَّر المائدة و g (6) من أكسيد النحاس، ثم أضع المادتين اللتين وزنتهما في أنبوب الاختبار الأوَّل.
2. **أُصمِّم نموذجًا:** أُدخِل أحد طرفي أنبوب الوصل الزجاجي في ثقب السِّدادة، وأُثبِّتها على فتحة أنبوب الاختبار، ثم أُعلِّق أنبوب الاختبار بالحامل، ثم أضعه على المِنْصَب فوق مصدر الحرارة.
3. **أُجرِّب:** أغمس الطرف الآخر من أنبوب الوصل في ماء الجير الرائق الموجود في الكأس الزجاجية الأولى.
4. **أُلاحِظ:** أُوقد لهب بنسن تحت أنبوب الاختبار الأوَّل مدَّة min (5) ، مُلاحِظًا ما يحدث لماء الجير في الكأس الزجاجية.
5. **أقيس:** أَزِن g (2) من ملح الطعام و g (6) من أكسيد النحاس، ثم أضع المادتين اللتين وزنتهما في أنبوب الاختبار الثاني.
6. أُكرِّر الخطوات من الرقم (2) إلى الرقم (4)، مُستخدِمًا الكأس الزجاجية الثانية.
7. **أُقارِن** ما يحدث لماء الجير في الكأسين الزجاجيتين في أثناء التفاعل، ثم أُدوِّن النتائج التي توصَّلْتُ إليها.

التحليل والاستنتاج:

1. **أُفسِّر** النتائج التي توصَّلْتُ إليها.
2. **أتوقَّع** سبب استخدام ملح الطعام في الأنبوب الثاني.
3. **أتواصل:** أُناقِش زملائي/ زميلاتي في النتائج التي توصَّلْتُ إليها.



الدرس 1

المُركَّبات العضوية الحيوية
Bioorganic Compounds

الفكرة الرئيسة:

تحتوي أجسام الكائنات الحيَّة على أربعة أنواع رئيسة من المُركَّبات العضوية الحيوية، هي: الكربوهيدرات، والبروتينات، والليبيدات، والحموض النووية. ولكلٍّ من هذه الأنواع دور حيوي في أجسام الكائنات الحيَّة.

نتاجات التعلُّم:

- أُوضِّح دور عنصر الكربون في تكوين أجسام الكائنات الحيَّة.
- أُقارِن بين تراكيب الأنواع الرئيسة من المُركَّبات العضوية الحيوية وخصائص كلٍّ منها.

المفاهيم والمصطلحات:

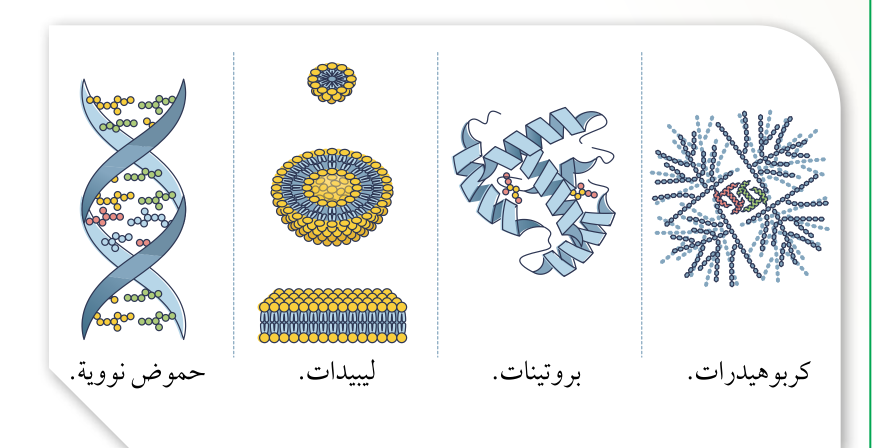
المُركَّبات العضوية الحيوية Bioorganic Compounds
السُّكَّريات الأُحادية Monosaccharides
السُّكَّريات الثنائية Disaccharides
السُّكَّريات المُتعدِّدة Polysaccharides
الدهون الثلاثية Triglycerides
الليبيدات المُفسفَرة Phospholipids
الستيرويدات Steroids
الرابطة الفوسفاتية ثنائية الإستر Phosphodiester Bond

ما المُركَّبات العضوية الحيوية؟
What are Bioorganic Compounds?

تحتوي أجسام الكائنات الحيَّة جميعها على ذَرّات عناصر مهمة، منها: الهيدروجين، والكربون، والأكسجين، والنيتروجين، والكالسيوم، والفسفور، إضافةً إلى ذَرّات عناصر أُخرى تحتاج إليها هذه الكائنات بكمِّيات بسيطة. ويُعَدُّ الكربون العنصر الأساس الذي يدخل في تركيب المُركَّبات العضوية جميعها.

المُركَّبات العضوية الحيوية Bioorganic Compounds مُركَّبات كيميائية توجد في أجسام الكائنات الحيَّة، ويدخل في تركيبها بصورة أساسية ذَرّات الكربون والهيدروجين، ويدخل في تركيب بعضها أيضًا ذَرّات عناصر أُخرى، مثل: النيتروجين، والأكسجين. ترتبط ذَرّات الكربون في المُركَّبات العضوية الحيوية بروابط تساهمية بعضها مع بعض، ومع ذَرّات العناصر الأُخرى. توجد أربعة أنواع رئيسة للمُركَّبات العضوية الحيوية، هي:

الكربوهيدرات Carbohydrates، والبروتينات Proteins، والليبيدات Lipids، والحموض النووية Nucleic Acids، أنظر الشكل (1).

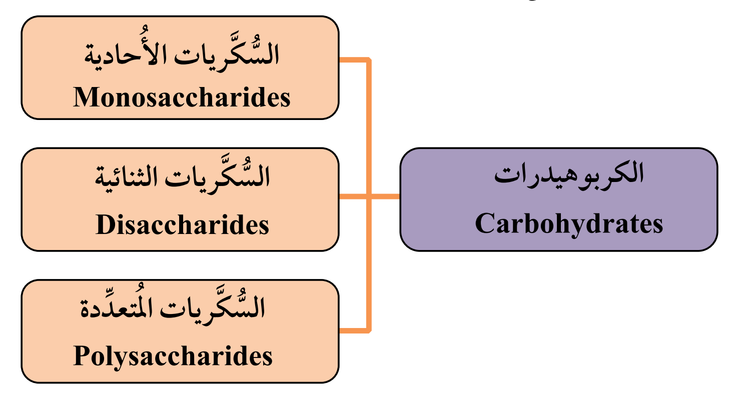


الشكل (1): مُركَّبات عضوية حيوية.

✓ **أتحقَّق:** ما أنواع المُركَّبات العضوية الحيوية الرئيسة في جسم الإنسان؟

الكربوهيدرات Carbohydrates

تحتوي الكربوهيدرات على ذرّات كربون وهيدروجين وأكسجين، وهي تُصنَّف بحسب عدد الوحدات التي تتألَّف منها إلى ثلاثة أنواع رئيسة، أنظر الشكل (2).



الشكل (2): تصنيف الكربوهيدرات.

السُّكَّريات الأُحادية Monosaccharides

تُعَدُّ **السُّكَّريات الأُحادية Monosaccharides** أبسط أنواع الكربوهيدرات، وهي تذوب في الماء بسهولة لأنَّها من المواد المُحِبَّة له Hydrophilic. أمّا صيغتها العامة فهي $(CH_2O)n$، حيث n عدد ذرّات الكربون في السُّكَّر الأُحادي.

تكون الصيغة البنائية للسُّكَّر الأُحادي على شكل حلقي، أو سلسلة مفتوحة غير مُتفرِّعة. ويُعَدُّ هذا النوع من السُّكَّريات وحدات بنائية لأنواع الكربوهيدرات الأُخرى، ومن الأمثلة عليه: الغلوكوز الذي يُمثِّل الوحدة البنائية لعدد من السُّكَّريات المُتعدِّدة في أجسام الكائنات الحيَّة، أنظر الشكل (3).

أُفكِّر: يتكوَّن السُّكَّر الأُحادي (الرايبوز) من عشر ذرّات هيدروجين، فما عدد ذرّات الكربون فيه؟

شكل حلقي. سلسلة مفتوحة.
(أ) الغلوكوز.

شكل حلقي. سلسلة مفتوحة.
(ب) الغلاكتوز.

الشكل (3): السُّكَّريات الأُحادية: (أ): الغلوكوز. (ب): الغلاكتوز.

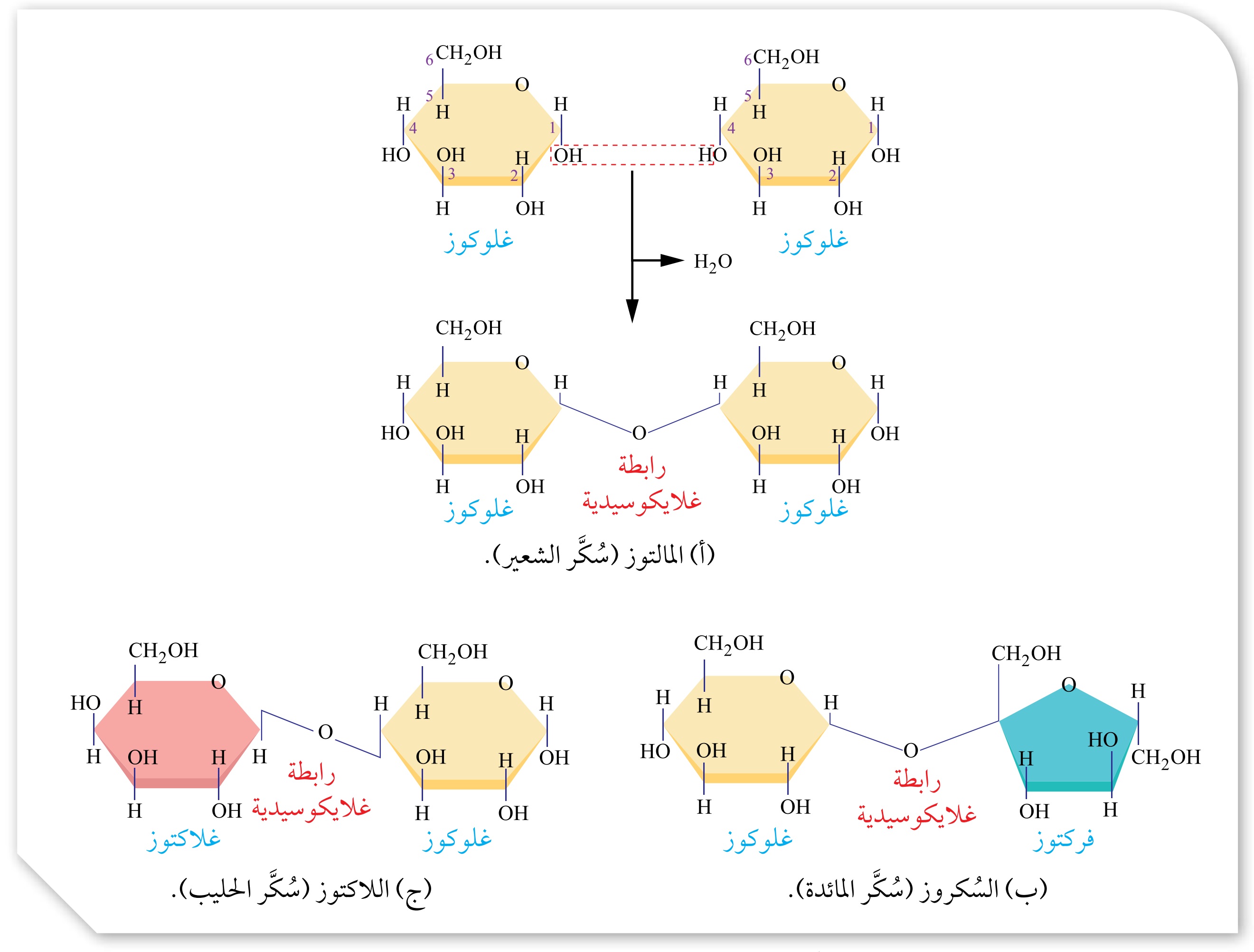
السُّكَّريات الثنائية Disaccharides

يتكـوَّن **السُّـكَّر الثنائـي Disaccharide** مـن وحدتـين مـن السُّـكَّريات الأُحادية، ترتبطـان معًـا برابطـة تسـاهمية غلايكوسـيدية Glycocidic Bond، ويحـدث الارتبـاط عـن طريـق نـزع جـزيء مـاء، أنظـر الشـكل (4/ أ) الـذي يُبـيِّن تفاعـل نـزع الماء Dehydration Reaction لإنتـاج سُـكَّر المالتـوز. ومـن الأمثلـة عـلى السُّـكَّريات الثنائيـة أيضًـا: السُـكروز، واللاكتـوز، أنظـر الشـكل (4/ ب)، والشـكل (4/ ج).

أتحقَّق: أُقارِن بين السُكروز واللاكتوز من حيث السُّكَّريات الأُحادية التي تُكوِّن كُلًّا منهما.

الربط بالصحة

يـؤدّي الإكثـار مـن تنـاول السُّـكَّريات إلى تسـوُّس الأسـنان، وزيـادة الـوزن؛ مـا يزيـد خطـر الإصابـة بمـرض السُّـكَّري؛ لـذا يـوصي المركـز الوطنـي للغُـدد الصُّـمِّ والسُّـكَّري بعـدم الإكثـار مـن تناولهـا للوقايـة مـن الإصابـة بمـرض السُّكـَّـري. أُصمِّـم مطويـة عـن ذلـك، ثـم أُوزِّعهـا عـلى زمـلائي/ زميلاتي والمجتمع المحلي لتوعيتهـم بـأضرار الإكثـار مـن تنـاول السُّـكَّريات.



الشكل (4): السُّكَّريات الثنائية: (أ): المالتوز. (ب): السُكروز. (ج): اللاكتوز.

السُّكَّريات المُتعدِّدة Polysaccharides

السُّكَّريات المُتعدِّدة Polysaccharides مُبلمرات تتكوَّن من سُكَّريات أحادية (أو مشتقاتها) ترتبط في ما بينها بروابط تساهمية غلايكوسيدية. ولكلٍّ من السُّكَّريات المُتعدِّدة خصائص تُميِّزها، أنظر الجدول (1).

✔ **أتحقَّق:** أُقارِن الروابط الموجودة بين جزيئات الغلوكوز في السلسلة الواحدة من السيليلوز بالروابط الموجودة بين سلاسل الغلوكوز المُتوازِية في السيليلوز.

الجدول (1): السُّكَّريات المُتعدِّدة.

المثال	الصيغة البنائية	الأهمية
النشا: يتكوَّن من: – الأميلوز: من السُّكَّريات المُتعدِّدة، وهو يكون على شكل سلاسل غير مُتفرِّعة من الغلوكوز. – الأميلوبكتين: من السُّكَّريات المُتعدِّدة، وهو يكون على شكل سلاسل من الغلوكوز مُتفرِّعة في بعض المواقع.	أميلوز. أميلوبكتين.	تخزين سُكَّر الغلوكوز في النباتات.
الغلايكوجين: يتكوَّن من سلاسل من الغلوكوز كثيرة التفرُّع.	غلايكوجين.	تخزين سُكَّر الغلوكوز في أكباد الحيوانات وعضلاتها.
السيليلوز: يتكوَّن من ألياف دقيقة، تتألَّف من وحدات من الغلوكوز ترتبط في ما بينها بروابط غلايكوسيدية، مُشكِّلةً سلاسل غير مُتفرِّعة ترتبط معًا بروابط هيدروجينية.	روابط غلايكوسيدية روابط هيدروجينية سيليلوز.	إكساب الجُدُر الخلوية في النباتات القوَّة والمرونة بوصفه مكوِّنًا رئيسًا لهذه الجُدُر.

الربط بالكيمياء

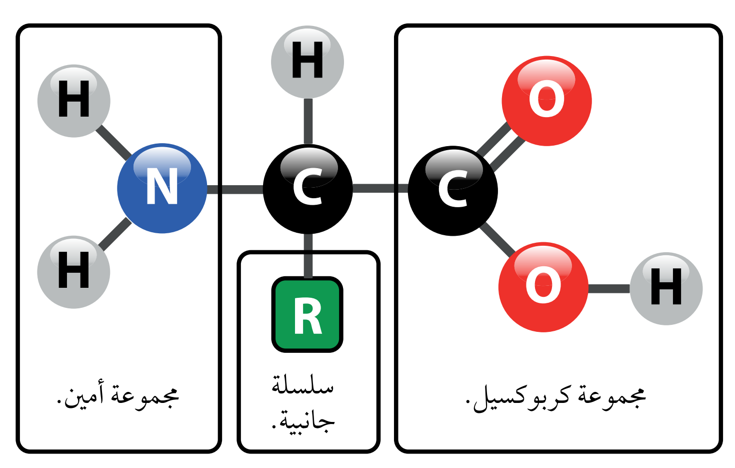
المجموعة الوظيفية: مجموعة من الذَّرّات في المُركَّب العضوي، تُسهِم في تمييز مُركَّب عن غيره من المُركَّبات، ومن أمثلتها:

- مجموعة الهيدروكسيل (OH).
- مجموعة الكربوكسيل (COOH).
- مجموعة الأمين (NH_2).
- مجموعة الفوسفات (PO_4^{3-}).

البروتينات Proteins

تتألَّف البروتينات من وحدات بنائية أساسية تُسمّى الحموض الأمينية Amino Acids، وترتبط الحموض الأمينية معًا بروابط تساهمية ببتيدية Peptide Bonds.

تشترك الحموض الأمينية - في ما بينها - في صيغتها العامة التي تحوي نوعين من المجموعات الكيميائية، هما: مجموعة الكربوكسيل (COOH)، ومجموعة الأمين (NH_2)، إضافةً إلى سلسلة جانبية يُرمَز إليها بالرمز R، وتختلف من حمض أميني إلى آخر؛ ما يجعل لكلِّ حمض أميني خصائص ينفرد بها عن غيره، أنظر الشكل (5).



الشكل (5): الصيغة البنائية العامة للحموض الأمينية.

يحتوي الحمض الأميني غلايسين Glycine على أبسط سلسلة جانبية R، وهي ذَرَّة الهيدروجين H، في حين تحتوي السلسلة الجانبية في الحموض الأمينية الأُخرى على الكربون، ومن الأمثلة على هذه السلاسل الجانبية: CH_2OH، CH_2SH، أنظر الشكل (6).

(أ) غلايسين: $H_2N-\underset{H}{\overset{H}{C}}-COOH$

(ب) سيرين: $H_2N-\underset{CH_2OH}{\overset{H}{C}}-COOH$

(ج) سستين: $H_2N-\underset{CH_2SH}{\overset{H}{C}}-COOH$

الشكل (6): بعض أنواع الحموض الأمينية.

أُحدِّد السلسلة الجانبية في كل حمض أميني ورد ذكره في الشكل.

يدخل في تركيب البروتينات عشرون حمضًا أمينيًّا مختلفًا، ويستطيع جسم الإنسان تصنيع أحد عشر حمضًا أمينيًّا منها فقط. أمّا الحموض الأمينية التسعة الأُخرى فيحصل عليها الجسم من الغذاء، وهي تُسمّى الحموض الأمينية الأساسية. تُصنَّف الحموض الأمينية وَفقًا لخصائص السلاسل الجانبية التي تحويها إلى مجموعتين رئيستين، هما: الحموض الأمينية المُحِبَّة للماء، والحموض الأمينية الكارهة للماء.

✓ **أتحقَّق**: ما الذي يُميِّز حمضًا أمينيًّا من آخر؟

الربط بالصحة النفسية

أثر التربتوفان في تحسين المزاج

يحتاج جسم الإنسان إلى الحمض الأميني تربتوفان Tryptophan، الذي يُعَدُّ أحد الحموض الأمينية الأساسية التي تدخل في تصنيع الناقل العصبي الهرموني السيروتونين، ويُسمّى أيضًا هرمون السعادة.

وقد أشارت دراسات منشورة إلى أنَّ الحمض الأميني تربتوفان يُسهِم في تحسين المزاج وتخفيف التوتُّر لدى الأشخاص من مختلف الأعمار، فضلًا عن وجود علاقة بين احتواء حليب الأطفال الرُّضَّع على هذا الحمض وخلودهم إلى النوم براحة وهدوء.



نقل الغازات في الدم.	تحفيز التفاعلات الكيميائية.	الإسهام في الاستجابة المناعية.	استقبال المواد الكيميائية.
الهيموغلوبين.	الإنزيمات.	جسم مضاد.	مُستقبِل بروتيني لبعض أنواع الهرمونات.






الشكل (7): بعض وظائف البروتينات.

تُمثِّل البروتينات أكثر من 50% من الكتلة الجافة لمعظم الخلايا، وهي تؤدّي وظائف مختلفة في أجسام الكائنات الحيَّة، مثل ألياف الكولاجين التي تمنح الغضاريف المرونة والقوَّة، أنظر الشكل (7) الذي يُبيِّن وظائف أُخرى للبروتينات.

قد ترتبط البروتينات بالسُّكَّريات، مُكوِّنةً بروتينات سُكَّرية Glycoproteins، ومن الأمثلة عليها مُولِّدات الضد Antigens التي توجد على سطوح خلايا الجسم، ولا يُسبِّب وجودها في الحالات الطبيعية حدوث استجابة مناعية ضدها في الجسم، في حين تُسبِّب مُولِّدات الضد الغريبة (غير الذاتية) التي تدخل الجسم حدوث استجابة مناعية ضدها في الجسم.

من الأمثلة على مُولِّدات الضد في جسم الإنسان: مُولِّد الضد (A) الذي يوجد على سطوح خلايا الدم الحمراء لدى كل شخص فصيلة دمه (A) بحسب نظام ABO لفصائل الدم. ووَفقًا لهذا النظام، فإنَّه توجد أربع فصائل لدم الإنسان، هي: A، B، AB، O، وذلك بناءً على وجود أحد مُولِّدي الضد A، أو B، أو كليهما، أو عدم وجودهما، أنظر الجدول (2) الذي يُبيِّن مُولِّدات الضد على سطوح خلايا الدم الحمراء والأجسام المضادة في البلازما لفصائل الدم الأربع بحسب نظام ABO.

أُفكِّر: يحثُّ ديننا الحنيف على الاعتدال في المأكل والمشرب. قال تعالى: ﴿وَكُلُوا۟ وَٱشْرَبُوا۟ وَلَا تُسْرِفُوٓا۟ إِنَّهُۥ لَا يُحِبُّ ٱلْمُسْرِفِينَ﴾ (سورة الأعراف، الآية 31). يُسهِم تناول الغذاء المُتوازِن في المحافظة على صحة الجسم. اعتمادًا على ما تعلَّمْتُه عن وظائف البروتينات، أُبيِّن أثر عدم تناول البروتينات بكمِّيات مُناسِبة في صحة جسمي.

الجدول (2): فصائل الدم بحسب نظام ABO.

فصيلة الدم	O	A	B	AB
خلايا الدم الحمراء				
مُولِّدات الضد على سطوح خلايا الدم الحمراء	لا يوجد	A	B	A , B
الأجسام المضادة في البلازما	Anti-A Anti-B	Anti-B	Anti- A	لا يوجد

يوجد نظام آخر يُعرَف بنظام العامل الريزيسي Rh، ويشير إلى وجود مُولِّد ضد على سطــوح خلايا الدم الحمراء يُسمّى مُولِّد الضد D، أو عدم وجوده. وفي حال وجود مُولِّد الضد D على سطوح خلايا الدم الحمراء، يوصَف الشخص بأنَّه موجب العامل الريزيسي Rh^+. أمّا في حال عدم وجوده، فيوصَف الشخص بأنَّه سالب العامل الريزيسي Rh^-، ولا يوجد في بلازما دمه أجسام مضادة (Anti–D)، إلّا أنَّه يُنتِجها في صورة استجابة مناعية إذا نُقِلت إليه خلايا دم حمراء من شخص موجب العامل الريزيسي.

عند نقل خلايا دم حمراء من شخص إلى آخر، فإنَّه يُنظَر إلى مُولِّدات الضد التي على سطوح خلايا الدم الحمراء لدى المُتبرِّع Donor، وإلى الأجسام المضادة في بلازما الدم لدى المُستقبِل Recipient. فمثلًا، عند نقل خلايا دم حمراء من مُتبرِّع فصيلة دمه A إلى مُستقبِل فصيلة دمه B، فإنَّ الأجسام المضادة (Anti-A) التي في بلازما دم المُستقبِل ترتبط بمُولِّدات الضد A على سطوح خلايا الدم الحمراء للمُتبرِّع، مُسبِّبةً تحلُّلها؛ فتظهر على المُستقبِل أعراض عديدة، مثل: القشعريرة، والحُمّى، وقد يصاب بقصور في وظائف الكُلى، وقد يؤدّي ذلك إلى وفاته. وفي سياق مُتَّصِل، إذا كان الشخص سالب العامل الريزيسي Rh^- فلا يُمكِنه استقبال خلايا دم حمراء من مُتبرِّع موجب العامل الريزيسي Rh^+؛ ذلك أنَّ جسمه سيُكوِّن أجسامًا مضادةً (Anti-D) في بلازما دمه،

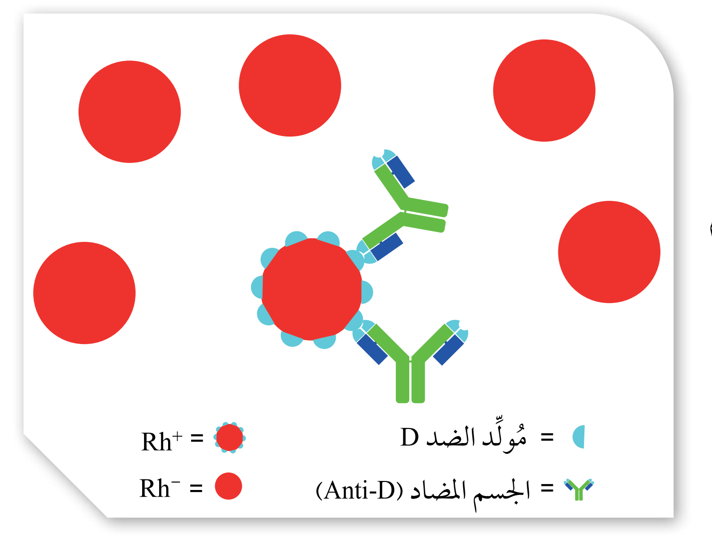
معًا لنُنقِذ حياةً

أُعِدُّ عرضًا تقديميًّا يهدف إلى تعريف المجتمع المحلي بأهمية التبرُّع بالدم، وتشجيعه على ذلك، مُضمِّنًا العرض ما درسْتُه من معلومات عن نظامي ABO وRh.

أتحقَّق: أذكر الأعراض التي قد تظهر على شخص فصيلة دمه (A) عند نقل خلايا دم حمراء إليه من مُتبرِّع فصيلة دمه (B).

بوصفها استجابةً مناعيةً، فترتبط الأجسام المضادة (Anti-D) في بلازما دم المُستقبِل بمُولِّدات الضد D على سطوح خلايا الدم الحمراء في دم المُتبرِّع، أنظر الشكل (8).

أفكِّر: يحتاج مريض فصيلة دمه O^- إلى نقل وحدتين من بلازما الدم. إذا توافرت وحدتا بلازما، إحداهما من مُتبرِّع فصيلة دمه AB^+، والأُخرى من مُتبرِّع فصيلة دمه B^+، فهل يُمكِن استخدام كلتا الوحدتين لنقل البلازما إليه، أم يُكتفى بإحداهما لعدم مُناسَبة الأُخرى لدمه؟ أُبرِّر إجابتي.



الشكل (8): ارتباط الأجسام المضادة (Anti-D) بمُولِّدات الضد D.

مثال

أُصيب شخص فصيلة دمه A^- في حادث سير، واستدعت حالته نقل خلايا دم حمراء إليه، ورغب اثنان من أصدقائه التبرُّع بخلايا دم حمراء له، وكانت فصيلة دم أحدهما AB^+، وفصيلة دم الآخر O^-. أيُّ الصديقين يُمكِنه فقط التبرُّع له؟ (علمًا بأنَّ المصاب لم تُنقَل إليه خلايا دم حمراء من قبلُ).

المعطيات:

المُتبرِّعان المُحتمَلان: AB^+، و O^-، المُستقبِل: A^-.

المطلوب:

تحديد المُتبرِّع الذي فصيلة دمه تُناسِب الشخص المصاب (المُستقبِل).

الحل:

1) في حالة المُتبرِّع الذي فصيلة دمه AB^+:

مُولِّدات الضد لدى المُتبرِّع المُحتمَل الأوَّل الذي فصيلة دمه AB^+	الأجسام المضادة لدى المُستقبِل الذي فصيلة دمه A^-
A، وB	Anti-B
D	سيُكوِّن Anti-D (استجابة مناعية).

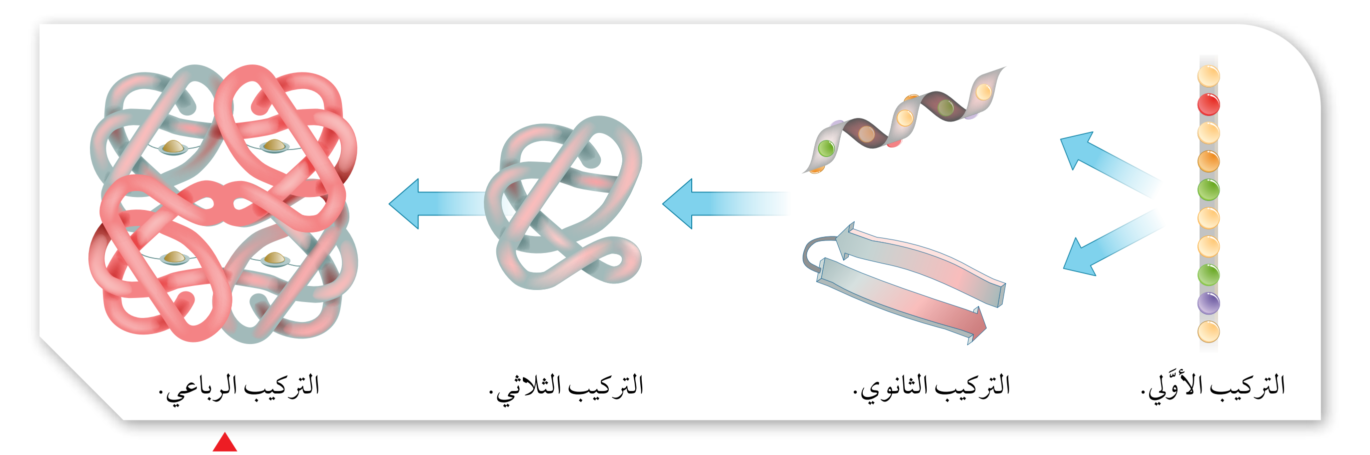
لا يُمكِن للمُتبرِّع الأوَّل التبرُّع بالدم؛ لأنَّ الأجسام المضادة (Anti-B) من بلازما دم المُستقبِل سترتبط بمُولِّدات الضد B على سطوح خلايا الدم الحمراء من دم المُتبرِّع، مُسبِّبةً تحلُّلها، وستظهر على المُستقبِل (المصاب) أعراض عديدة، مثل: القشعريرة، والحُمّى، وقد يصاب بقصور في وظائف الكُلى، وقد يؤدّي ذلك إلى وفاته.

في ما يتعلَّق بنظام Rh، سيُكوِّن المُستقبِل أجسامًا مضادةً (Anti-D) - بوصفها استجابةً مناعيةً - ترتبط بمُولِّدات الضد D على سطوح خلايا الدم الحمراء من دم المُتبرِّع.

2) في حالة المُتبرِّع الذي فصيلة دمه O^-:

مُولِّدات الضد لدى المُتبرِّع المُحتمَل الثاني الذي فصيلة دمه O^-	الأجسام المضادة لدى المُستقبِل الذي فصيلة دمه A^-
ــــــــ	Anti-B

إذن، المُتبرِّع الذي فصيلة دمه O^- هو الذي يُمكِنه التبرُّع بالدم (بخلايا دمه الحمراء) للمصاب؛ نظرًا إلى عدم وجود مُولِّدات الضد B، وD على سطوح خلايا الدم الحمراء في دم هذا المُتبرِّع.



الشكل (9): مستويات تركيب البروتينات.

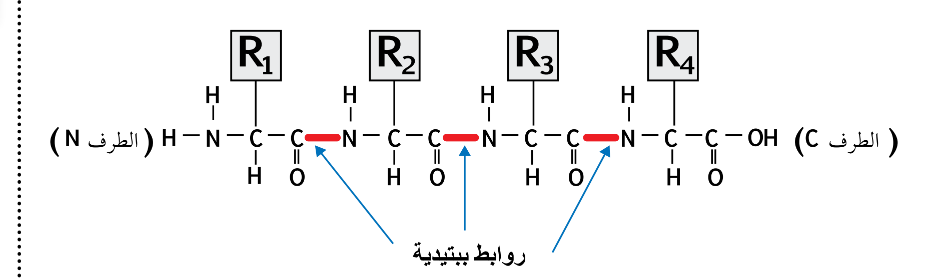
مستويات تركيب البروتينات Levels of Proteins Structure

تختلف البروتينات بعضها عن بعض تبعًا لاختلاف الحموض الأمينية التي تدخل في تركيبها، وعددها، وتسلسلها.

توجد أربعة مستويات تركيبية للبروتينات، هي: التركيب الأوَّلي Primary Structure، والتركيب الثانوي Secondary Strucrture، والتركيب الثلاثي Tertiary Structure، والتركيب الرباعي Quaternary Structure، أنظر الشكل (9).

التركيب الأوَّلي Primary Structure

ترتبط الحموض الأمينية معًا بروابط تساهمية ببتيدية، فتتشكَّل سلسلة عديد الببتيد. ويوصَف التسلسل الخطّي للحموض الأمينية في سلسلة عديد الببتيد بأنَّه التركيب الأوَّلي للبروتين، وتكون مجموعة الأمين في بدايتها (تُسمّى الطرف N)، وتكون مجموعة الكربوكسيل في نهايتها (تُسمّى الطرف C)، أنظر الشكل (10).



الشكل (10): التركيب الأوَّلي للبروتين (سلسلة عديد الببتيد).

يُمثِّل التركيب الأوَّلي للبروتين الهيكل الأساسي لمستويات البروتين الأُخرى، وهو لا يؤدّي أيَّ وظيفة في صورته الأوَّلية.

أُنشِئ مُخطَّطًا مفاهيميًّا باستخدام رسوم SmartArt لتوضيح مستويات تركيب البروتينات، ثم أُضيف إليه تدريجيًّا ما سأتعلَّم عنها في الصفحات التالية.

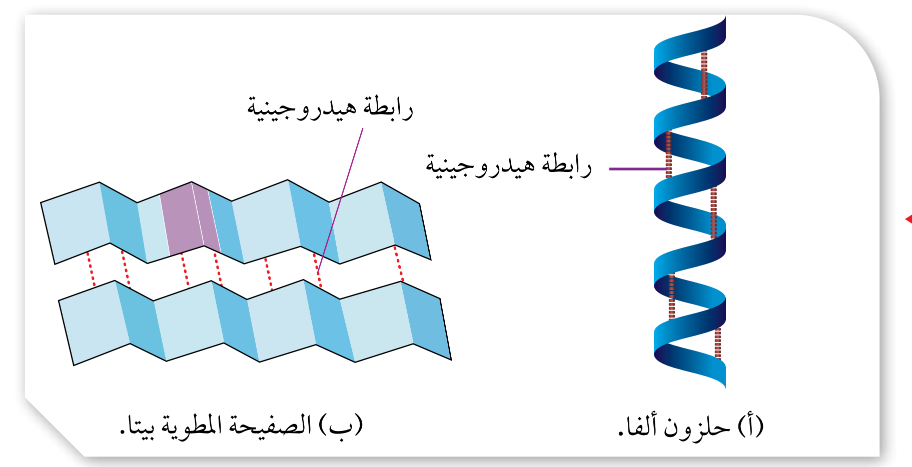
أتحقَّق: لماذا يُحتمَل أنْ تختلف سلسلتا عديد ببتيد، إحداهما عن الأُخرى، بالرغم من تكوُّنهما من الحموض الأمينية نفسها، واحتوائهما على العدد نفسه من هذه الحموض؟

أفكّر: أُحدِّد الذَّرّات التي تتكوَّن بينها روابط هيدروجينية في حمضين أمينيين عند التفاف سلسلة عديد الببتيد، وتكوُّن تركيب حلزون ألفا.

التركيب الثانوي Secondary Structure

ينتج التركيب الثانوي من التفاف سلسلة عديد ببتيد واحدة، وتكوُّن روابط هيدروجينية في مناطق مُحدَّدة منها، وهي روابط تعمل على تثبيت التركيب الثانوي واستقراره.

يوجد تركيبان ثانويان شائعان، أحدهما حلزوني يُسمّى حلزون ألفا α-Helix، والآخر يُسمّى الصفيحة المطوية بيتا β-Sheet. يتكوَّن تركيب حلزون ألفا عند التفاف سلسلة عديد الببتيد، وتكوُّن روابط هيدروجينية بين ذرَّة الأكسجين في مجموعة الكربوكسيل في حمض أميني وذرَّة الهيدروجين في مجموعة الأمين في حمض أميني آخر يبعد عن الحمض الأميني الأوَّل أربعة حموض أمينية، أنظر الشكل (11/ أ). أمّا تركيب الصفيحة المطوية بيتا فيتكوَّن عند ارتباط جزأين أو أكثر من سلسلة عديد الببتيد نفسها بروابط هيدروجينية؛ إذ تكون هذه الأجزاء المُكوِّنة لسلسلة عديد الببتيد بجانب بعضها في شكل مُتعرِّج (zig-zag)؛ ما يتيح لها تكوين الروابط الهيدروجينية في ما بينها، أنظر الشكل (11/ ب).



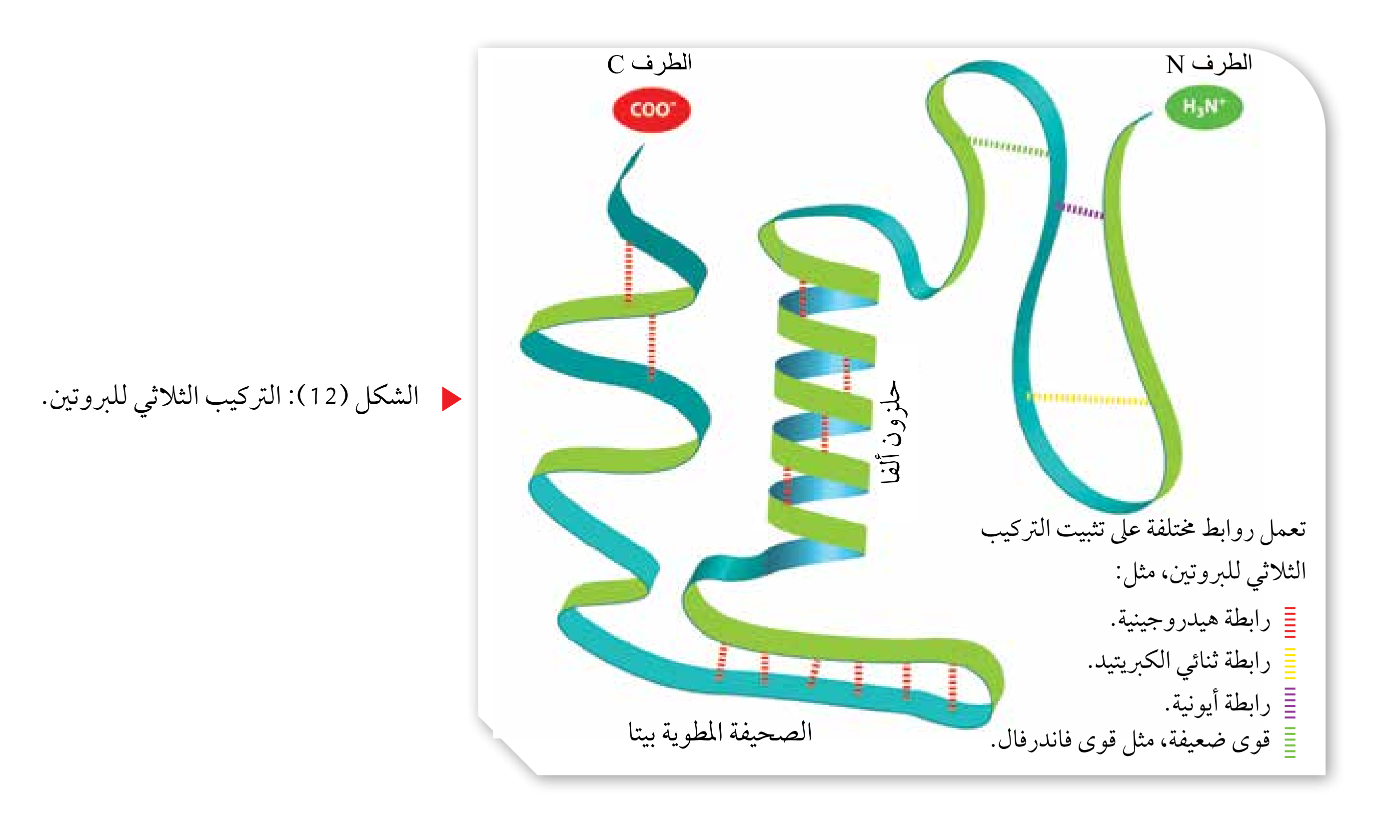
الشكل (11): التركيب الثانوي للبروتين.

التركيب الثلاثي Tertiary Structure

أفكّر: ما التراكيب الثانوية التي نتج من طيِّها بروتين الميوغلوبين؟

ينتج التركيب الثلاثي من طَيِّ التراكيب الثانوية في سلسلة عديد الببتيد. وتعمل أنواع مختلفة من الروابط تكون غالبًا بين ذَرّات السلاسل الجانبية R لسلسلة عديد الببتيد على تثبيت شكل التركيب الثلاثي، أنظر الشكل (12).

من الأمثلة على البروتينات ذات التركيب الثلاثي: بروتين الميوغلوبين الذي يحمل الأكسجين في العضلات، وينتج من طَيِّ التراكيب الثانوية لحلزون ألفا. وفي حال فَقَدَ أحد البروتينات تركيبه الثلاثي، فإنَّ ذلك يُفقِده القدرة على أداء وظيفته الحيوية، كما يحدث في الإنزيمات.



الشكل (12): التركيب الثلاثي للبروتين.

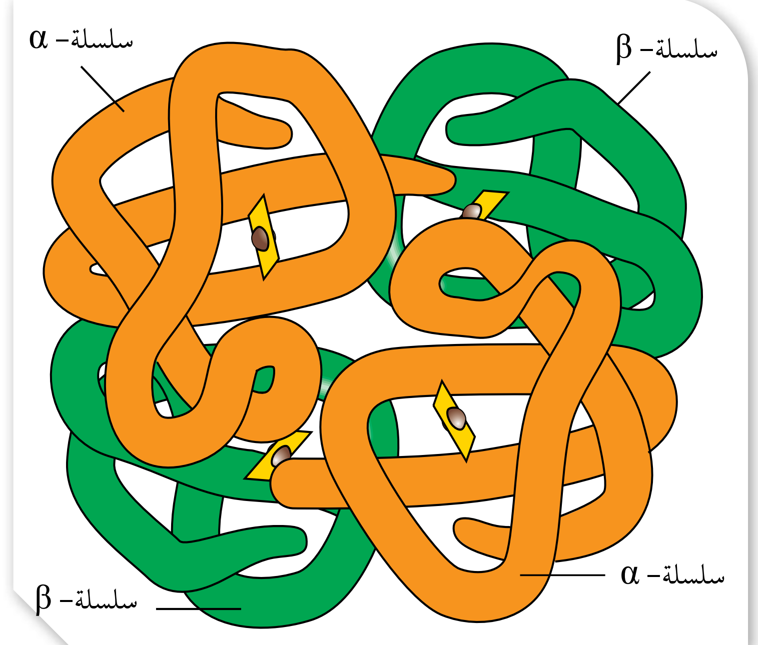
التركيب الرباعي Quaternary Structure

يُطلَق اسم التركيب الرباعي على البروتينات التي تتكوَّن من سلسلتين أو أكثر من عديد الببتيد، خلافًا للتركيب الأوَّلي والتركيب الثانوي والتركيب الثلاثي؛ إذ يتكوَّن كلٌّ منها من سلسلة عديد ببتيد واحدة، علمًا بأنَّ التركيب الرباعي يُثبَّت عن طريق روابط مختلفة، شأنه في ذلك شأن التركيب الثلاثي.

أتحقَّق: كيف يتكوَّن التركيب الثلاثي للبروتينات؟

من الأمثلة على البروتينات ذات التركيب الرباعي: الهيموغلوبين الذي يتألَّف من أربع سلاسل ببتيدية؛ اثنتان منها من النوع α، واثنتان أُخريان من النوع β، أنظر الشكل (13)، لكنَّ ذلك لا يعني بالضرورة أنَّ جميع البروتينات ذات التركيب الرباعي تتألَّف من أربع سلاسل ببتيدية؛ فالكولاجين مثلًا هو من البروتينات ذات التركيب الرباعي، إلّا أنَّه يتكوَّن من ثلاث سلاسل ببتيدية.

يُذكَر أنَّ سلسلتي ألفا وسلسلتي بيتا في الهيموغلوبين لا تعني حلزون ألفا والصفيحة المطوية بيتا.



الشكل (13): التركيب الرباعي للهيموغلوبين.

تصنيف البروتينات Classification of Proteins

تُصنَّف البروتينات وَفقًا لشكلها النهائي الثلاثي الأبعاد إلى نوعين، هما:

البروتينات الكروية Globular Proteins: يتكوَّن هذا النوع من بروتينات تركيبها ثلاثي أو رباعي، مثل الهيموغلوبين ومعظم الإنزيمات.

تؤدّي البروتينات الكروية دورًا في عمليات الجسم الحيوية، وتكون ذائبة في الماء ؛ نظرًا إلى وجود سلاسلها الجانبية R القطبية (المُحِبَّة للماء) في اتجاه الخارج مُواجِهةً المحاليل المائية التي تحيطها، ووجود سلاسلها الجانبية R غير القطبية (الكارهة للماء) في اتجاه الداخل.

البروتينات الليفية Fibrous Proteins: يتكوَّن هذا النوع من بروتينات تركيبها ثانوي، أو ثلاثي، أو رباعي، ومن أمثلته: بروتين الفايبرين Fibrin الذي له دور في تجلُّط الدم.

لا تكون البروتينات الليفية غالبًا ذائبة في الماء ؛ لأنَّ سلاسلها الجانبية R غير القطبية (الكارهة للماء) تكون في اتجاه الخارج مُواجِهةً المحاليل المائية.

توجد بروتينات تتكوَّن من أجزاء ليفية وأُخرى كروية، مثل بروتين الميوسين في العضلة الهيكلية.

الليبيدات Lipids

لليبيدات وظائف عِدَّة في أجسام الكائنات الحيَّة؛ إذ تُشكِّل طبقة عازلة تحت جلد الإنسان وبعض الحيوانات؛ ما يحول دون فقدان الحرارة من أجسامهم، وتدخل في تركيب الأغشية البلازمية، والهرمونات الستيرويدية، وفي تركيب الفيتامينات الذائبة في الدهون (فيتامين A، وK، وE، وD)، وتُعَدُّ مصدرَ طاقةٍ مُهِمًّا للكائنات الحيَّة.

تُصنَّف الليبيدات إلى أنواع عِدَّة، منها: الحموض الدهنية، والدهون الثلاثية، والليبيدات المُفسفَرة ، والستيرويدات. توجد صفة مشتركة بين الليبيدات جميعها، تتمثَّل في عدم امتزاجها بالماء.

✓ **أتحقَّق:** لماذا تكون البروتينات الكروية ذائبة في الماء؟

أُلخِّص وظائف الليبيدات التي درسْتُها في أجسام الكائن الحيِّ مستعينًا بصور من شبكة الإنترنت، ثم أستخدم برمجية Power point لعرضها أمام زملائي/ زميلاتي في الصف.

الربط بالصحة

تُجرى فحوص مخبرية لتعرُّف مستويات بعض البروتينات والإنزيمات في الدم؛ ما يساعد على كشف الإصابة بمرض مُعيَّن. فمثلًا، تُفحَص عيِّنة الدم للكشف عن إنزيم يُسمّى Alanine Aminotransferase (ALT)؛ وهو إنزيم يوجد في خلايا الكبد، ويعمل على تحويل الحمض الأميني ألانين إلى بيروفيت. وفي حال تسرَّب هذا الإنزيم من الكبد إلى الدم نتيجة خلل في خلايا الكبد ، فإنَّ مستوياته في الدم سترتفع. أُعِدُّ منشورًا لتوعية المجتمع المحلي بأهمية الفحوص الطبية الدورية في المحافظة على الصحة.

الحموض الدهنية Fatty Acids

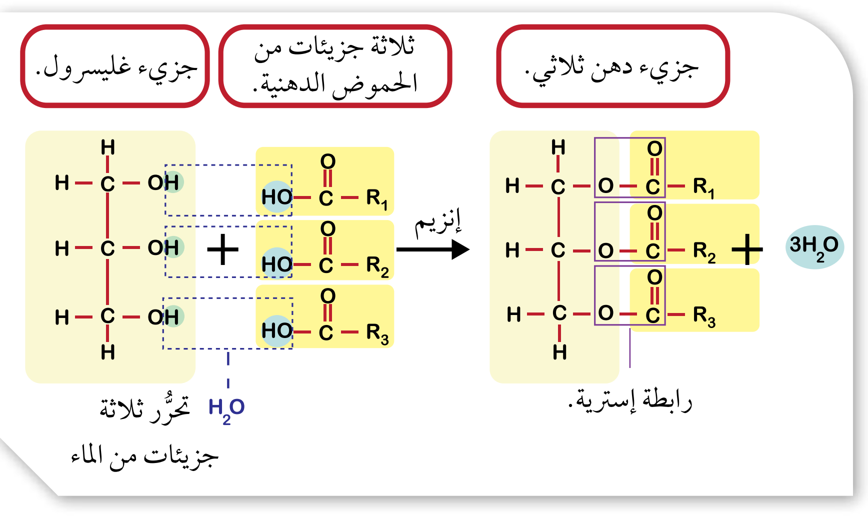
تدخل الحموض الدهنية في تركيب معظم الليبيدات، ومنها ما يكون حُرًّا. يتكوَّن الحمض الدهني من مجموعة كربوكسيل (COOH)، وسلسلة هيدروكربونية، أنظر الشكل (14).

تُصنَّف الحموض الدهنية إلى نوعين، هما:

- الحموض الدهنية المُشبَعة: وفيها تكون الروابط جميعها أُحادية بين ذَرّات الكربون في السلسلة الهيدروكربونية، أنظر الشكل (15)، ومن أمثلتها: حمض الباليتيك Palmitic Acid؛ وهو المُكوِّن الرئيس لزيت النخيل.
- الحموض الدهنية غير المُشبَعة: وفيها توجد رابطة ثنائية واحدة على الأقل بين ذَرّات الكربون في السلسلة الهيدروكربونية، أنظر الشكل (16)، ومن أمثلتها: حمض الأوليك Oleic Acid؛ وهو المُكوِّن الرئيس لزيت الزيتون.

الدهون الثلاثية Triglycerides

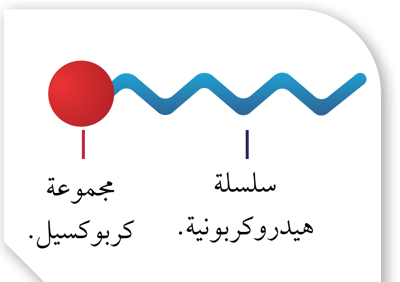
الدهون الثلاثية Triglycerides: هي الليبيدات التي تتكوَّن من اتحاد جزيء غليسرول واحد مع ثلاثة جزيئات من الحموض الدهنية بروابط تساهمية إسترية، أنظر الشكل (17).



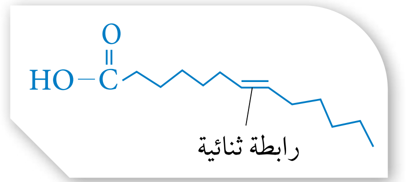
الشكل (17): تكوُّن دهن ثلاثي.

أُوضِّح السبب الذي يؤدّي إلى إنتاج ثلاثة جزيئات ماء عند تكوُّن جزيء دهن ثلاثي.

تعتمد خصائص الدهون الثلاثية على خصائص الحموض الدهنية المُكوِّنة لها؛ إذ تكون معظم الدهون الثلاثية غير المُشبَعة سائلة في درجة حرارة الغرفة، مثل معظم الزيوت النباتية، في حين تكون الدهون الثلاثية المُشبَعة صُلْبة في درجة حرارة الغرفة وتُسمّى دهونًا، مثل: الزبدة، والسمن الحيواني.



الشكل (14): حمض دهني.



الشكل (15): حمض دهني مُشبَع.

رابطة ثنائية

الشكل (16): حمض دهني غير مُشبَع.

الربط بعلم التصنيع الغذائي

تعمل بعض مصانع الزيوت على تحويل الزيوت السائلة إلى سمن نباتي، أو زبدة شبه صُلْبة، عن طريق عملية كيميائية تُسمّى هدرجة الزيوت، وذلك بإضافة الهيدروجين إلى الزيوت السائلة غير المُشبَعة؛ لتحويلها إلى زيوت مُشبَعة ذات قوام مرغوب فيه. من الأمثلة على الدهون المُهدرَجة صناعيًّا: السمن النباتي، والزبدة الصناعية (المارجرين)، وبعض أنواع زبدة الفول السوداني. وقد حذَّرت مُنظَّمات غذائية عِدَّة من استخدام الزيوت المُهدرَجة في الغذاء؛ نظرًا إلى ما تُسبِّبه من أمراض للقلب، وتصلُّبٍ للشرايين، وأوصت بضرورة قراءة بطاقة المعلومات على المواد الغذائية بعناية.

الليبيدات المُفسفَرة Phospholipids

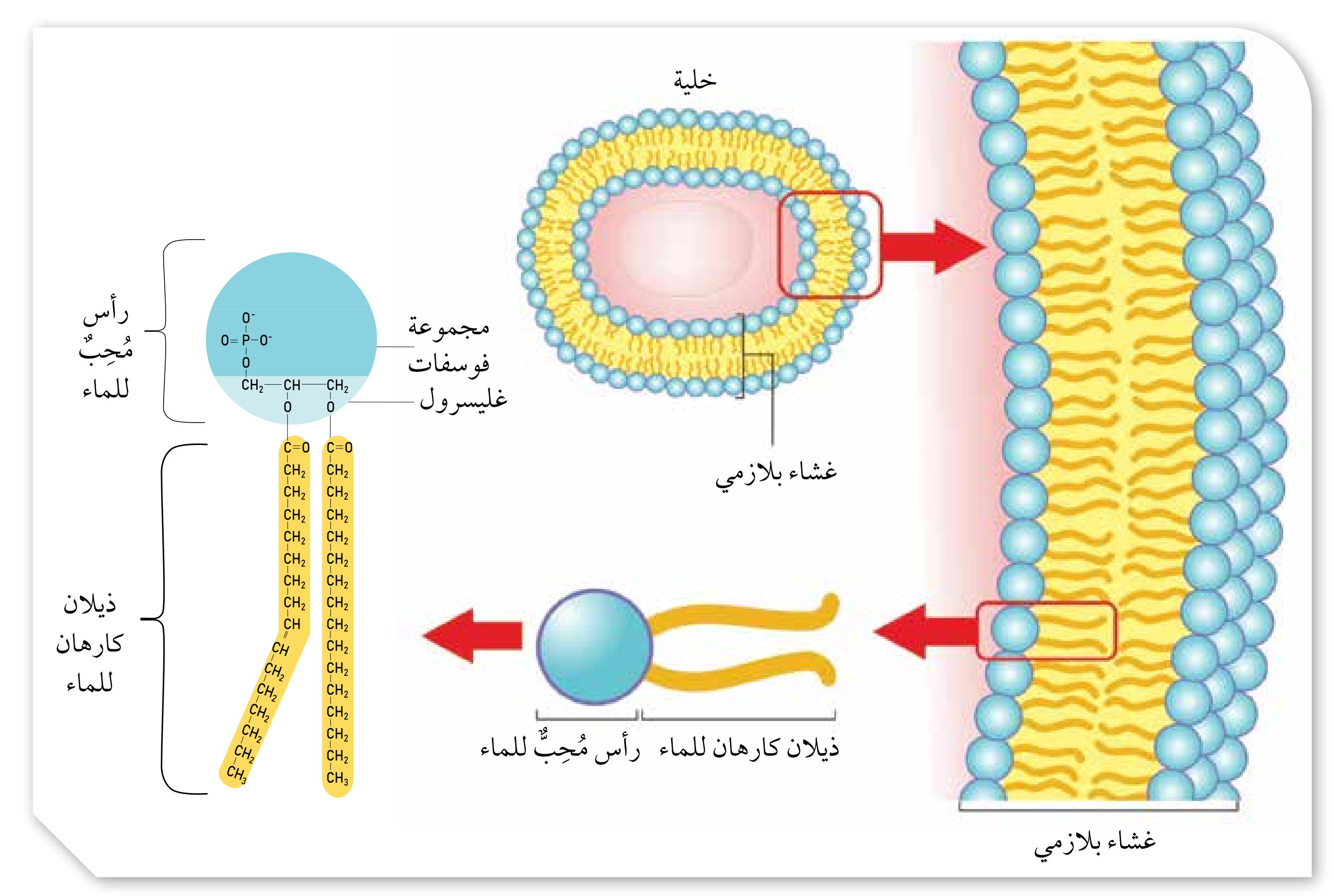
الليبيدات المُفسفَرة Phospholipids: هي الليبيدات التي تتكوَّن من جزيء غليسرول مُرتبِط بمجموعة فوسفات، فيتشكَّل رأس قطبي مُحِبٌّ للماء. وفي الوقت نفسه، يرتبط جزيء الغليسرول بجزيئين من الحموض الدهنية، فيتشكَّل ذيلان كارهان للماء.

يحتوي الغشاء البلازمي على طبقة مُزدوَجة من الليبيدات المُفسفَرة التي تترتَّب في صفَّين مُتقابِلين. وفيها تُقابِل الرؤوس القطبية الماء، في حين تبتعد عنه الذيول الكارهة له، أنظر الشكل (18).

لا تمرُّ المواد الذائبة في الماء بسهولة عبر الغشاء البلازمي؛ نظرًا إلى وجود الجزء غير القطبي (الذيول الكارهة للماء) الذي يقع وسط الغشاء، ويُعوِّق مرور هذه المواد؛ ما يُنظِّم حركة المواد بين داخل الخلية وخارجها.

أُفكِّر: لماذا تتَّجِه ذيول الحموض الدهنية إلى الداخل في الغشاء البلازمي؟

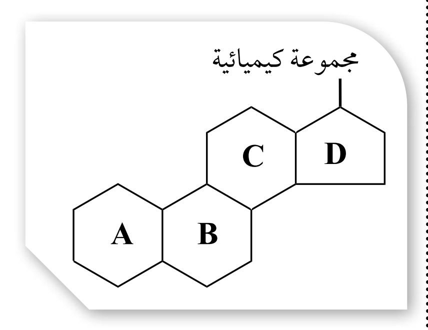
الشكل (18): توزيع الليبيدات المُفسفَرة في الغشاء البلازمي.



الستيرويدات Steroids

الستيرويدات Steroids: هي الليبيدات التي تتكوَّن من أربع حلقات كربونية مُلتحِمة؛ ثلاث منها سداسية، وواحدة خماسية، إضافةً إلى مجموعة كيميائية ترتبط بالحلقة الرابعة، وتختلف من ستيرويد إلى آخر، أنظر الشكل (19).

يُعَدُّ الكولسترول مثالًا على الستيرويدات، ويستطيع جسم الإنسان تصنيعه في الكبد، ويُمكِن الحصول عليه من مصادر غذائية حيوانية. وهو يدخل في تركيب الأغشية البلازمية الحيوانية، والهرمونات الستيرويدية، مثل الألدوستيرون الذي يؤدّي دورًا في تنظيم عمل الوحدة الأنبوبية الكلوية. وبالرغم من أهمية الكولسترول، فإنَّ مستوياته العالية في الدم قد تكون لها صلة بأمراض القلب والأوعية الدموية.



الشكل (19): ستيرويد.

أتحقَّق: أُوضِّح الفرق بين الدهون الثلاثية والستيرويدات من حيث التركيب.



دور الليبيدات في تكيُّف أسماك القرش على العيش في أعماق البحار

أودع الله تعالى خصائص عِدَّة في أسماك القرش التي تعيش في أعماق البحار تساعدها على الطفو، منها: نسبة الليبيدات في أكبادها، وقوَّة عضلاتها. وقد أشارت دراسات عديدة إلى أنَّ أكباد أسماك القرش التي تعيش في أعماق البحار هي أكبر حجمًا من أكباد مثيلاتها التي تعيش في المياه الضحلة، وأنَّ نسبة الليبيدات في أكبادها أكثر أيضًا.

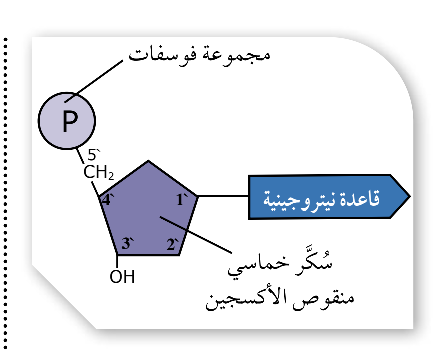
وجد العلماء أنَّ نسبة الألياف العضلية في أجسام أسماك القرش هذه هي أقل من نسبتها في أجسام مثيلاتها التي تعيش في المياه الضحلة. وقد انتهت نتائج الدراسات في هذا المجال إلى أنَّ نسبة الليبيدات المرتفعة تُقلِّل من كثافة أجسام أسماك القرش؛ ما يُمكِّنها من الطفو، والحفاظ على ارتفاع مُناسِب لها في الماء، من دون بذل مجهود عضلي كبير، وهو ما يُعَدُّ وسيلة لتقليل استهلاك الطاقة في بيئاتها الفقيرة بالغذاء.



الحموض النووية Nucleic Acids

درسْتُ سابقًا أنَّ الحموض النووية نوعان: حمض نووي رايبوزي منقوص الأكسجين DNA، وحمض نووي رايبوزي RNA.

تتألَّف الحموض النووية من وحدات بنائية تُسمّى النيوكليوتيدات Nucleotides، ويتكوَّن كل نيوكليوتيد من إحدى القواعد النيتروجينية، وسُكَّر خماسي، ومجموعة فوسفات، أنظر الشكل (20).



الشكل (20): تركيب نيوكليوتيد في جزيء DNA.

تُصنَّف القواعد النيتروجينية التي تدخل في تركيب النيوكليوتيدات إلى بيورينات Purines يتكوَّن كلٌّ منها من حلقتين، وبيريميدينات Pyrimidines يتكوَّن كلٌّ منها من حلقة واحدة، أنظر الشكل (21).

بيورينات.

غوانين (G).

أدينين (A).

بيريميدينات.

يوراسيل (U) في جزيء RNA.

ثايمين (T) في جزيء DNA.

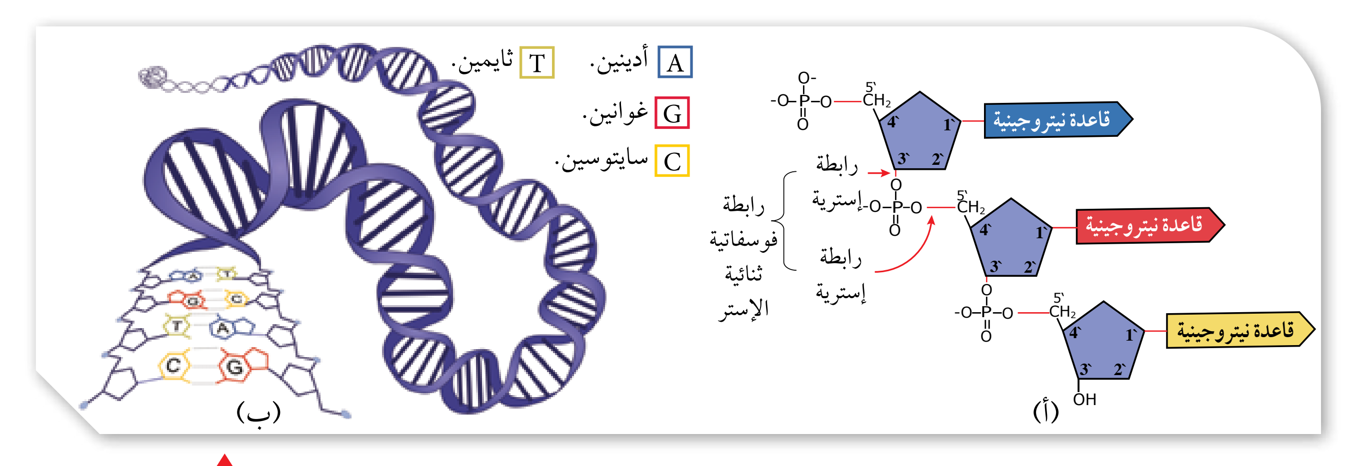
سايتوسين (C).

الشكل (21): البيورينات والبيريميدينات.

أيُّ القواعد النيتروجينية تُعَدُّ من البيورينات؟ أيُّها تُعَدُّ من البيريميدينات؟

يعمل الحمض النووي DNA على نقل الصفات الوراثية من الآباء إلى الأبناء. ويُبيِّن الشكل (22) جزيء DNA الذي يتكوَّن من سلسلتين من النيوكليوتيدات، تلتفّان على هيئة سُلَّم حلزوني مُزدوَج. ترتبط النيوكليوتيدات بعضها ببعض في السلسلة الواحدة عن طريق روابط فوسفاتية ثنائية الإستر **Phosphodiester Bonds**، أنظر الشكل (22/ أ).

ترتبط البيورينات في إحدى سلسلتي الحمض النووي DNA بالبيريميدينات المُكمِّلة لها في السلسلة المُقابِلة عن طريق روابط هيدروجينية. أمّا نسبة البيورينات إلى نسبة البيريميدينات في DNA فثابتة وَفقًا لقاعدةٍ تُعرَف بقاعدة تشارغاف Chargaff؛ ذلك أنَّ البيورين يرتبط



الشكل (22): جزيء DNA.

دائمًا بالبيريميدين المُكمِّل له في السلسلة المُقابِلة. فمثلًا، إذا احتوت قطعة من DNA على (25%) من الأدينين، فإنَّ نسبة الثايمين في السلسلة المُقابِلة تكون مُساوِية لها.

في عام 1953م، توصَّل العالِمان واتسون Watson وكريك Crick إلى بناء نموذج لجزيء DNA، ونالا جائزة نوبل في الفسيولوجيا والطب تكريمًا لهما على هذا الإنجاز، أنظر الشكل (22/ ب).

يتكوَّن الحمض النووي RNA غالبًا من سلسلة واحدة من النيوكليوتيدات، ولكنَّ بعض الفيروسات تحتوي على RNA من سلسلتين. يوجد في RNA القاعدة النيتروجينية يوراسيل بدلًا من الثايمين، ويؤدّي جزيء RNA دورًا مهمًّا في عملية تصنيع بروتينات الخلية.

أتحقَّق: أُقارِن بين DNA وRNA من حيث:
أ- وظيفة كلٍّ منهما.
ب- القواعد النيتروجينية الداخلة في تركيب كلٍّ منهما.

مثال

حلَّل باحث قطعتي DNA، فوجد أنَّ نسبة الأدينين في القطعة الأولى هي (31%)، وأنَّ نسبة السايتوسين في القطعة الثانية هي (27%). أيُّ القطعتين تحوي نسبة أعلى من الثايمين؟

المعطيات:

القطعة الأولى من DNA تحوي ما نسبته (31%) من الأدينين، والقطعة الثانية من DNA تحوي ما نسبته (27%) من السايتوسين.

المطلوب:

تحديد قطعة DNA التي فيها نسبة أعلى من الثايمين.

الحل:

نسبة الثايمين في DNA تساوي نسبة الأدينين؛ لذا، فإنَّ نسبة الثايمين في القطعة الأولى هي (31%). ولإيجاد نسبة الثايمين في القطعة الثانية، أحسُبُ نسبة السايتوسين والغوانين فيها:

$27\% \times 2 = 54\%$

ثم أطرح هذه النسبة من 100%:

$100\% - 54\% = 46\%$

إذن، نسبة الثايمين والأدينين معًا هي (46%).

لإيجاد نسبة الثايمين، أَقسِم الناتج على 2:

$46\% / 2 = 23\%$

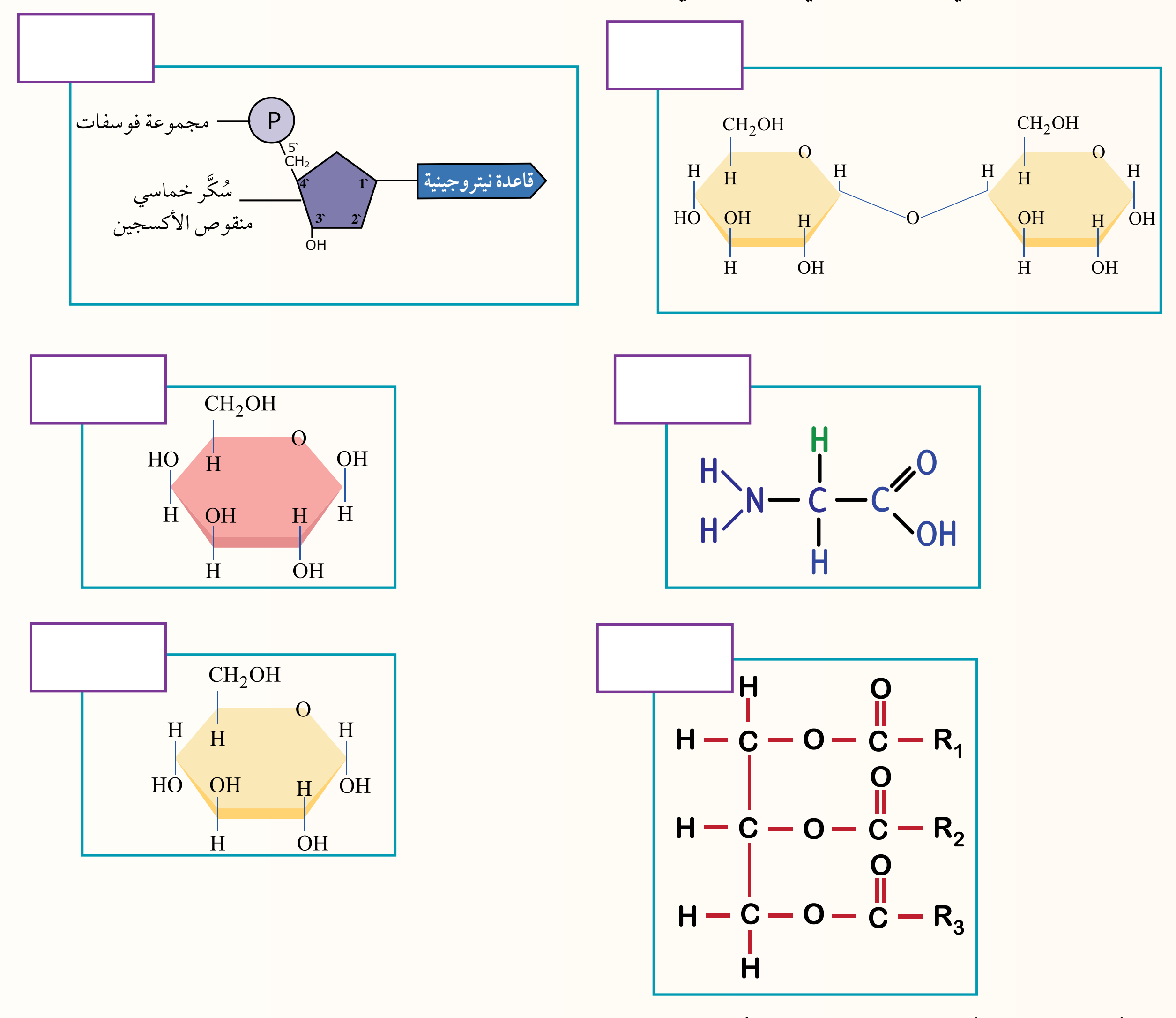
إذن، نسبة الثايمين هي (23%).

وبذلك، فإنَّ نسبة الثايمين في القطعة الأولى أعلى منها في القطعة الثانية.

مراجعة الدرس

1. **الفكرة الرئيسة**: أذكر الأنواع الرئيسة للمُركَّبات العضوية الحيوية، مُحدِّدًا دورًا واحدًا لكلٍّ منها في أجسام الكائنات الحيَّة.

2. أكتب في الصندوق المجاور لكل صيغة بنائية ممّا يلي اسم المُركَّب العضوي الذي تُمثِّله، مُستخدِمًا المفاهيم الآتية: سُكَّر ثنائي، حمض أميني، دهن ثلاثي، غلاكتوز، نيوكليوتيد، غلوكوز.

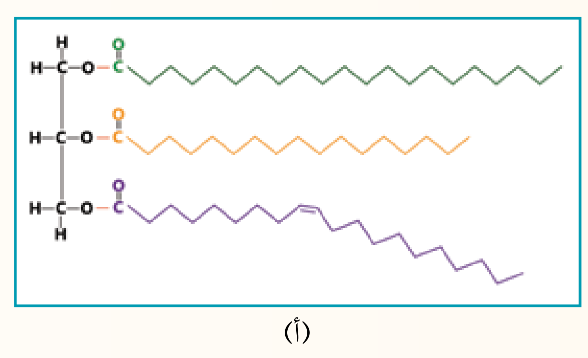


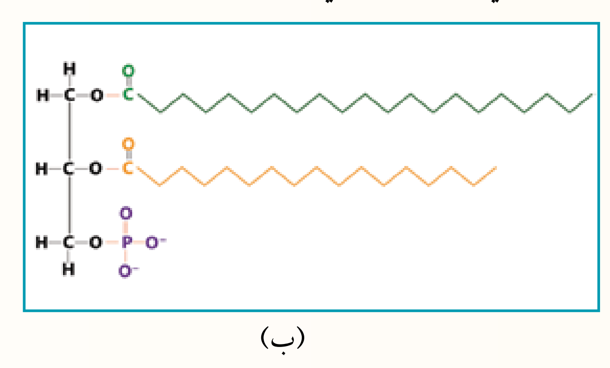
3. **أذكر** اثنين من أوجه الاختلاف بين الأميلوبكتين والغلايكوجين.

4. أُحدِّد عدد الحموض الأمينية وعدد الروابط الببتيدية التي توجد في سلسلة عديد الببتيد المُبيَّنة في الشكل الآتي.

```
        R1          R2          R3          R4          R5
    H   |       H   |       H   |       H   |       H   |
    |   |       |   |       |   |       |   |       |   |
H - N - C - C - N - C - C - N - C - C - N - C - C - N - C - C - OH
        |   ||      |   ||      |   ||      |   ||      |   ||
        H   O       H   O       H   O       H   O       H   O
```

5. **أُصنِّف** المُركَّبين العضويين الآتيين إلى ليبيد مُفسفَر، ودهن ثلاثي، مُفسِّرًا إجابتي.


(أ)


(ب)

6. أُجيب عمّا يأتي:

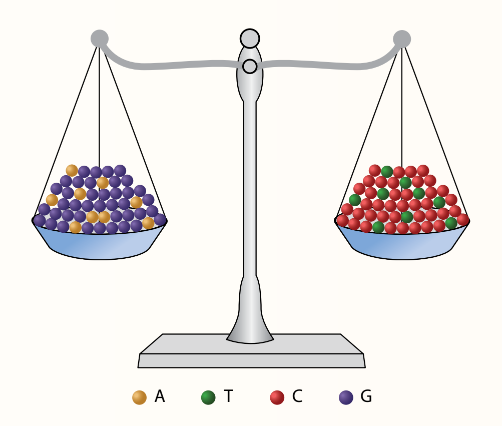
أ- فيمَ يختلف التركيب الرباعي للبروتين عن التراكيب في المستويات الأُخرى من حيث عدد سلاسل عديد الببتيد المُكوِّنة لكلٍّ منها؟

ب- أيُّ مُكوِّنات الستيرويد يُسبِّب اختلاف ستيرويد عن آخر؟

7. **أُفسِّر** أهمية وجود الليبيدات في كبد سمكة قرش تعيش في أعماق البحار.

8. هل يُمكِن لشخص فصيلة دمه A^- أنْ يتبرَّع بخلايا دم حمراء لمريض فصيلة دمه B^-؟ أُبرِّر إجابتي.

9. تُمثِّل الكرات في الشكل المجاور البيورينات والبيريميدينات كما هو مُوضَّح في مفتاح الشكل. ما القاعدة العلمية التي يُعبِّر عنها الشكل؟ أُوضِّح هذه القاعدة.



10. أُحدِّد اسم الرابطة التساهمية التي تربط بين كلٍّ ممّا يأتي:

أ- السُّكَّريات الأُحادية.

ب- الحموض الأمينية.

جـ- الحموض الدهنية والغليسرول.



الإنزيمات وجزيء حفظ الطاقة ATP
Enzymes and Energy Storing Molecule ATP

الفكرة الرئيسة:

للإنزيمات دور مهم في تحفيز التفاعلات الكيميائية وتسريعها، ولجزيء حفظ الطاقة ATP أيضًا دور في بعض التفاعلات التي تُحفِّزها الإنزيمات.

نتاجات التعلُّم:

- أُوضِّح دور الإنزيمات في التفاعلات الكيميائية في الخلية.
- أستقصي بعض العوامل المُؤثِّرة في نشاط الإنزيم.
- أُوضِّح دور جزيئات حفظ الطاقة ATP في الخلية.

المفاهيم والمصطلحات:

طاقة التنشيط Activation Energy

الموقع النشط Active Site

مُعقَّد الإنزيم- المادة المُتفاعِلة Enzyme- Substrate Complex

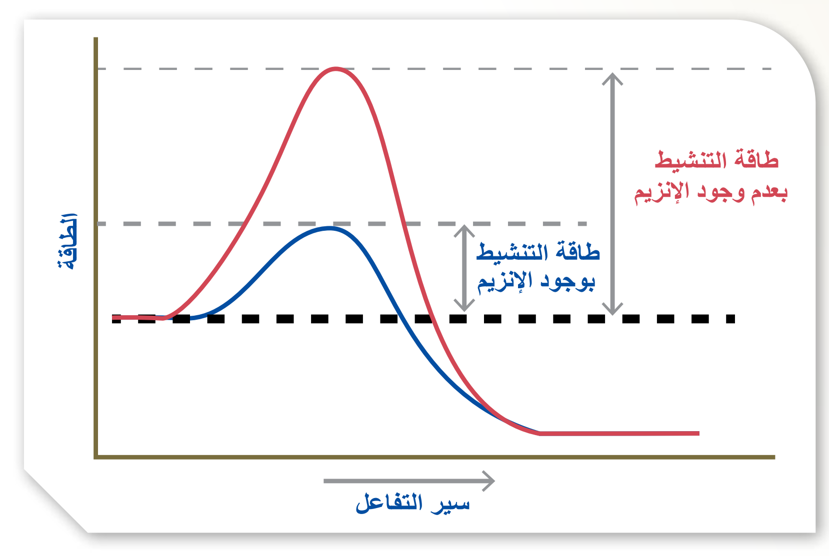
مُرافِق الإنزيم Coenzyme

الإنزيمات Enzymes

لاحظ العالِم إدوارد بوخنر Buchner عند إضافته مُستخلَصًا من خلايا الخميرة إلى سُكَّر السُكروز تحطّم هذا السُّكَّر، وإنتاج كحول وغاز ثاني أكسيد الكربون. وقد أُطلِق على المواد المُستخلَصة من الخلايا اسم الإنزيمات Enzymes، وهي تعني "داخل الخميرة". وقد نال هذا العالِم جائزة نوبل في الكيمياء عام 1907م بعد هذا الاكتشاف.

وجد العلماء أنَّ معظم التفاعلات الكيميائية التي تحدث داخل أجسام الكائنات الحيَّة تحتاج إلى **طاقة تنشيط Activation Energy** عالية؛ وهي الطاقة اللازمة لبَدْء التفاعل الكيميائي، وقد تبيَّن لهم أنَّ الإنزيمات تُسرِّع بعض التفاعلات الكيميائية عن طريق تقليل طاقة التنشيط، أنظر الشكل (23).

أتحقَّق: ما المقصود بطاقة التنشيط؟



الشكل (23): تقليل طاقة التنشيط بوجود الإنزيم.

الربط بعلم التصنيع

مساحيق الغسيل الحيوية Biological Washing Powders

استطاع الإنسان صناعة مساحيق غسيل حيوية تحتوي على إنزيمات تُحلِّل المواد الموجودة في بقع الملابس مثلما تهضم الإنزيمات الهاضمة البروتينات، وذلك اعتمادًا على خصائص الإنزيمات؛ إذ تُحلِّل الإنزيمات الموجودة في مسحوق الغسيل البقع؛ ما يؤدّي إلى تنظيف الملابس. تعمل هذه المساحيق في درجات حرارة منخفضة؛ ما يُعَدُّ وسيلة من وسائل توفير الطاقة.

آليَّة عمل الإنزيم Mechanism of Enzyme Action

درسْتُ سابقًا أنَّ معظم الإنزيمات هي بروتينات كروية الشكل، وأنَّ الإنزيمات عامَّة تُحفِّز التفاعلات الكيميائية من دون أنْ تُستهلَك فيها.

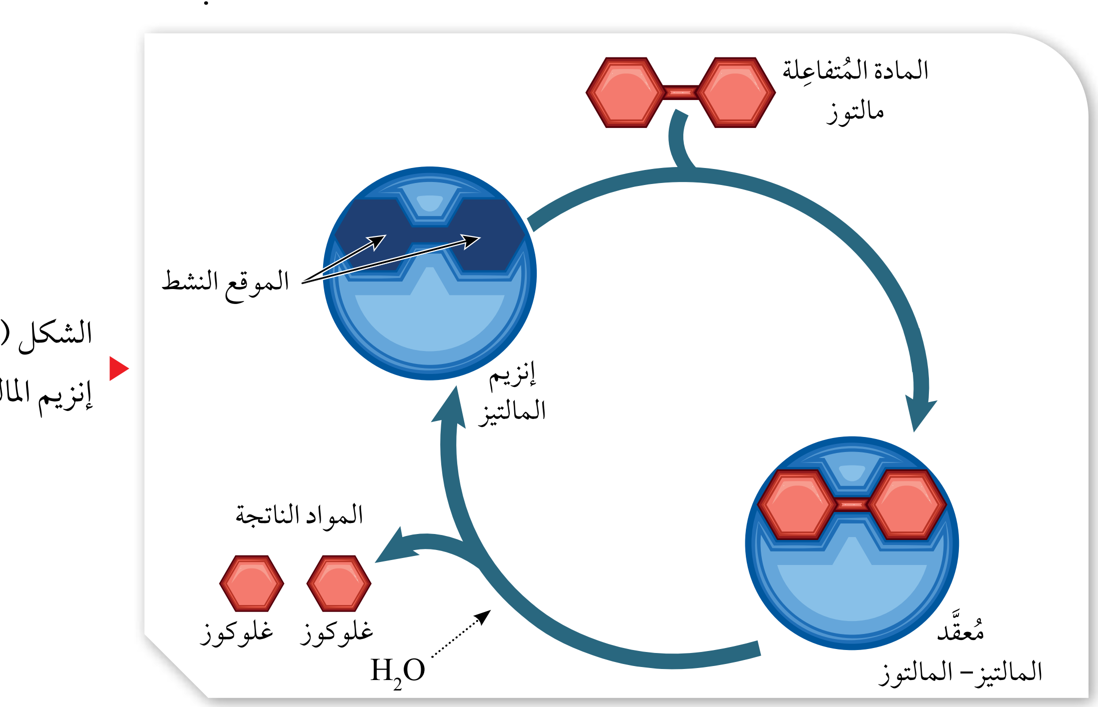
يوجد للإنزيم **موقع نشط** **Active Site** في صورة تجويف يتكوَّن من حموض أمينية مُعيَّنة، ويعمل قالبًا ترتبط به المادة المُتفاعِلة Substrate التي يُؤثِّر فيها الإنزيم، أنظر الشكل (24)، علمًا بأنَّه قد يوجد للإنزيم أكثر من موقع نشط.

ترتبط المادة المُتفاعِلة بالموقع النشط للإنزيم؛ فيتشكَّل **مُعقَّد الإنزيم- المادة المُتفاعِلة** **Enzyme - Substrate Complex**.

من الأمثلة على عمل الإنزيمات: إنزيم تصنيع الغلايكوجين Glycogen Synthase الذي يعمل على ربط الوحدات البنائية (الغلوكوز) لتكوين الغلايكوجين، وإنزيم المالتيز Maltase الذي يعمل على تفكُّك المالتوز إلى جزيئي غلوكوز، أنظر الشكل (25).



الشكل (24): الموقع النشط للإنزيم.



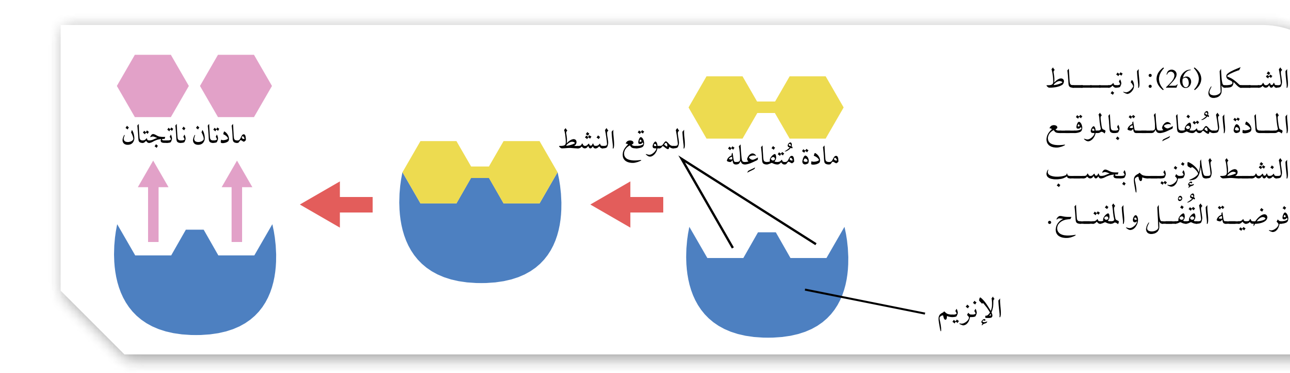
الشكل (25): آليَّة عمل إنزيم المالتيز.

تُمثَّل آليَّة عمل الإنزيم بالمعادلة الآتية:

المادة المُتفاعِلة + إنزيم ⇌ (مُعقَّد الإنزيم – المادة المُتفاعِلة) ⟵ إنزيم + المادة الناتجة

مالتوز + إنزيم المالتيز ⇌ (مُعقَّد المالتيز – المالتوز) ⟵ إنزيم المالتيز + (2) غلوكوز

✓ **أتحقَّق:** ما أهمية الموقع النشط؟



الشـكل (26): ارتبـاط المـادة المُتفاعِلـة بالموقـع النشـط للإنزيـم بحسـب فرضيـة القُفْـل والمفتـاح.

الفرضيات التي تُفسِّر ارتباط الإنزيم بالمادة التي يُؤثِّر فيها

Enzyme- Substrate Binding Hypothesis

وضـع العلـماء فرضيتـين لتفسـير عمليـة ارتبـاط المـادة المُتفاعِلـة بالموقـع النشـط للإنزيـم، همـا: فرضيـة القُفْـل والمفتـاح Lock and Key Hypothesis، وفرضيـة التـلاؤم المُسـتحَث Induced Fit Hypothesis.

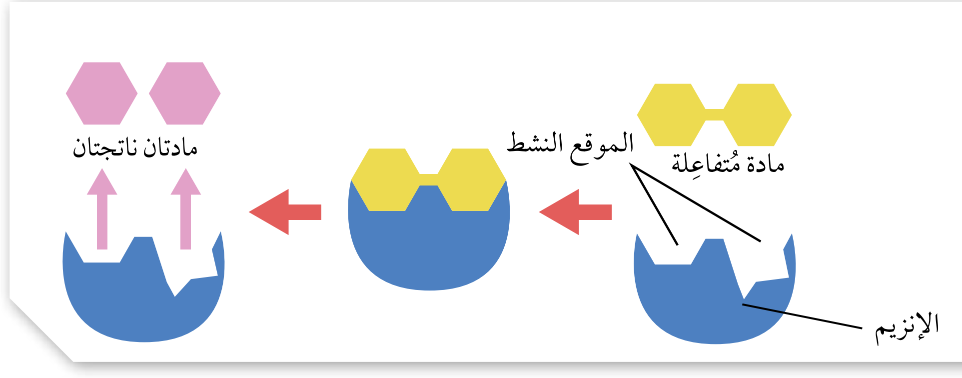
فرضية القُفْل والمفتاح Lock and Key Hypothesis

تقـوم هـذه الفرضية على أنَّ شـكل المـادة المُتفاعِلـة يتوافق مع شـكل الموقع النشـط للإنزيـم ؛ لـذا ترتبـط المـادة المُتفاعِلـة بالموقـع النشـط ارتباطًا كامـلًا كما تتداخـل مُسـنَّنات المفتـاح بالتجاويـف المُتوافِقـة مـع شـكلها في القُفْـل، أنظـر الشـكل (26).

فرضية التلاؤم المُستحَث Induced Fit Hypothesis

تقـوم هـذه الفرضية على أنَّ شـكل الموقع النشـط للإنزيم يتغيَّر تغيُّرًا بسـيطًا ومُؤقَّتًا عنـد ارتبـاط المـادة المُتفاعِلـة بـه؛ لكـي يُصبِـح مُناسِبًا لشـكلها، أنظـر الشـكل (27).

أتحقَّـــق: أيُّ الفرضيتيـن السـابقتين تُفسِّـر إمكانيـة ارتبـاط إنزيـم لـه موقـع نشـط واحـد بمـادة مُتفاعِلـة فـي تفاعـل مـا، وبمـادة مُتفاعِلـة أُخـرى فـي تفاعـل آخـر؟



الشـكل (27): ارتبـاط المـادة المُتفاعِلـة بالموقـع النشـط للإنزيـم بحسـب فرضيـة التـلاؤم المُسـتحَث.

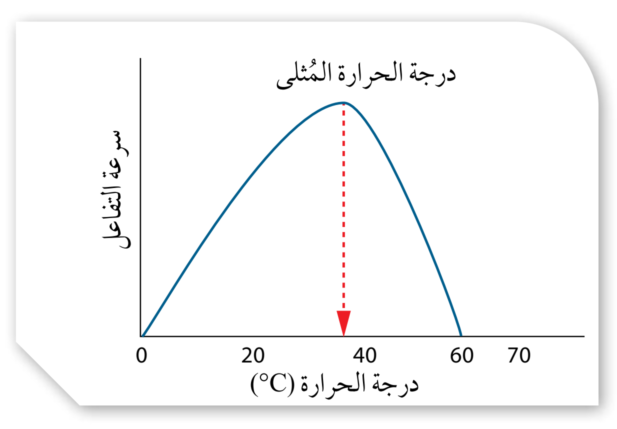
العوامل المُؤثِّرة في نشاط الإنزيم

Factors Affecting Enzyme Activity

تُؤثِّر بعض العوامل في نشاط الإنزيمات، مثل: درجة الحرارة، والرقم الهيدروجيني pH، وتركيز الإنزيم، وتركيز المادة المُتفاعِلة.

درجة الحرارة Temperature

يتأثَّر نشاط الإنزيم بدرجة حرارة الوسط الذي يحدث فيه التفاعل؛ فلكل إنزيم درجة حرارة مُثلى تكون عندها سرعة التفاعل الذي يُحفِّزه الإنزيم أعلى ما يُمكِن. وعند ارتفاع درجة حرارة الوسط أكثر من درجة الحرارة المُثلى، فإنَّ شكل البروتين المُكوِّن للإنزيم يتغيَّر؛ ما يؤدّي إلى تغيُّر شكل الموقع النشط، ويصبح غير مُتوافِق مع المادة المُتفاعِلة التي يعمل عليها، فيقل نشاط الإنزيم تدريجيًّا باستمرار الارتفاع في درجة الحرارة حتى يفقد قدرته على العمل.

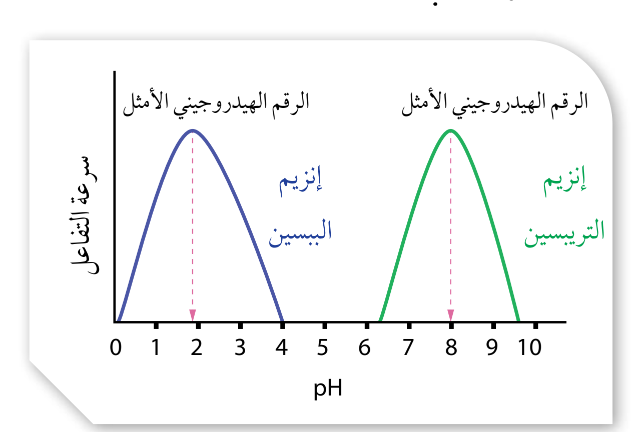


الشكل (28): أثر درجة الحرارة في سرعة تفاعل يُحفِّزه إنزيم.
أتتبَّع تأثُّر سرعة تفاعل يُحفِّزه إنزيم بزيادة درجة الحرارة.

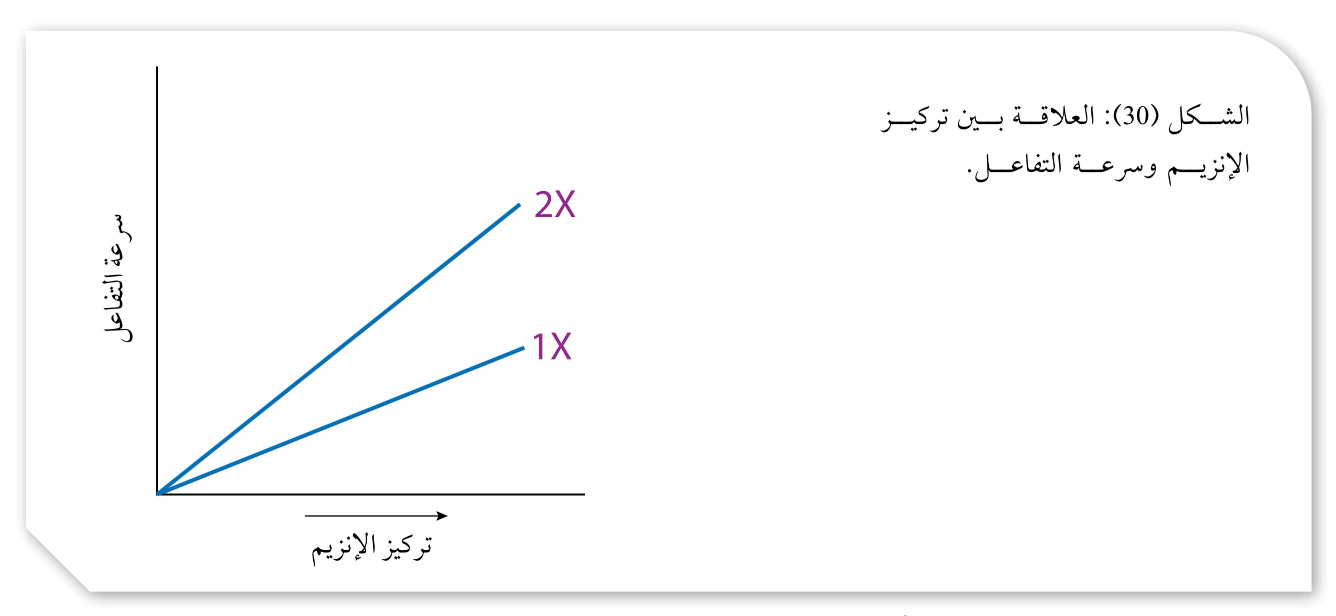
تعمل معظم الإنزيمات في جسم الإنسان بصورة مُثلى عند درجات الحرارة التي تتراوح بين (35 °C) و(40°C)؛ أيْ درجات الحرارة القريبة من درجة حرارة جسم الإنسان (37°C)، أنظر الشكل (28).

الرقم الهيدروجيني pH

يتأثَّر نشاط الإنزيم بالرقم الهيدروجيني pH للوسط الذي يحدث فيه التفاعل؛ فلكل إنزيم رقم هيدروجيني أمثل تكون عنده سرعة التفاعل الذي يُحفِّزه الإنزيم أعلى ما يُمكِن. أمّا الرقم الهيدروجيني الأمثل لعمل معظم الإنزيمات في جسم الإنسان فهو (pH=6-8). فمثلًا، يعمل إنزيم التريبسين في الأمعاء عند الرقم الهيدروجيني (pH=8) تقريبًا. ويُعَدُّ إنزيم البيبسين (إنزيم هضم في المعدة) من الاستثناءات؛ إذ يعمل بأقصى فاعلية عند الرقم الهيدروجيني (pH=1.5-2) تقريبًا، أنظر الشكل (29).



الشكل (29): أثر الرقم الهيدروجيني في سرعة تفاعلين يُحفِّز أحدهما إنزيم البيبسين، ويُحفِّز الآخر إنزيم التريبسين.



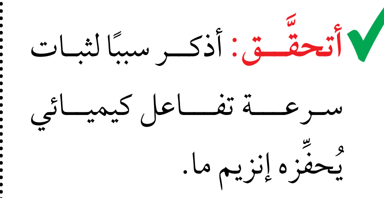
الشكل (30): العلاقة بين تركيز الإنزيم وسرعة التفاعل.

تركيز الإنزيم وتركيز المادة المُتفاعِلة

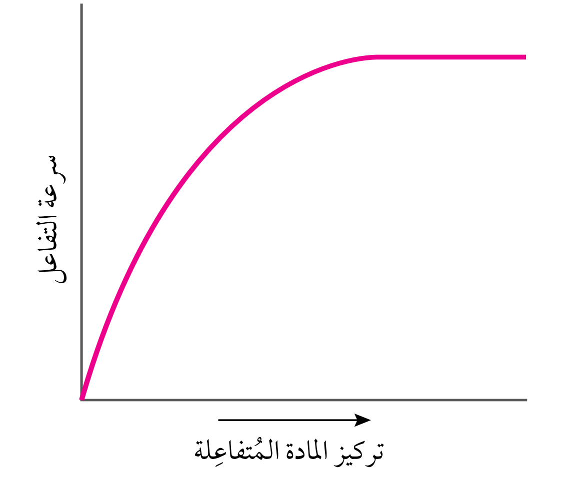
Enzyme Concentration and Substrate Concentration

كلَّما زاد تركيز الإنزيم زادت سرعة التفاعل الكيميائي؛ إذ تتوافر أعداد أكبر من المواقع النشطة للارتباط بالمادة المُتفاعِلة. فعلى سبيل المثال، إذا قارنْتُ سرعة تفاعلين مُتماثِلين؛ أحدهما أُجرِي بإضافة إنزيم تركيزه (1X)، والآخر بإضافة إنزيم تركيزه (2X)، مع تثبيت جميع العوامل الأُخرى في التفاعلين؛ فسأُلاحِظ أنَّ سرعة التفاعل الثاني هي ضعفا سرعة التفاعل الأوَّل، أنظر الشكل (30).

كلَّما زاد تركيز المادة المُتفاعِلة زادت سرعة التفاعل الكيميائي، وعندما تُشغَل جميع المواقع النشطة المتوافرة في جزيئات الإنزيم بجزيئات المادة المُتفاعِلة لا تحدث أيُّ زيادة في سرعة التفاعل بصرف النظر عن مقدار الزيادة في تركيز المادة المُتفاعِلة، أنظر الشكل (31).



أتحقَّق: أذكر سببًا لثبات سرعة تفاعل كيميائي يُحفِّزه إنزيم ما.



الشكل (31): العلاقة بين تركيز المادة المُتفاعِلة وسرعة التفاعل.



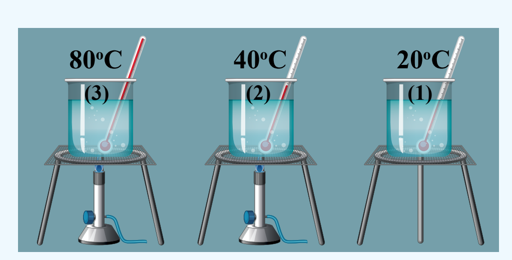
أثر الحرارة في نشاط إنزيم التريبسين

يُحفِّز إنزيم التريبسين تحلُّل Hydrolysis بروتين الحليب كازيين Casein الذي يُعطي الحليب لونه الأبيض، فيتحوَّل إلى عديد ببتيد عديم اللون؛ ما يؤدّي إلى اختفاء اللون الأبيض للحليب.

المواد والأدوات: (15) mL من إنزيم التريبسين، (15) mL من الحليب السائل، (3) أنابيب اختبار، مقياس درجة حرارة عدد (3)، حامل أنابيب اختبار، ماء من الصنبور، قلم تخطيط ثابت، (3) كؤوس سعة كلٍّ منها (250) mL، جليد، مخباران مُدرَّجان، مصدرا حرارة.

إرشادات السلامة: استعمال الماء الساخن ومصدر الحرارة بحذر.

خطوات العمل:



1. أُرقِّم أنابيب الاختبار بالأرقام (1-3)، ثم أضع علامة X عليها، ثم أضع كل أنبوب على حامل أنابيب الاختبار.
2. **أقيس:** أضع في كل أنبوب اختبار (5) mL من الحليب.
3. أضع في الكأس الأولى ماءً درجة حرارته 20ºC، ثم أضع في الكأس الثانية ماءً درجة حرارته 40ºC، ثم أضع في الكأس الثالثة ماءً درجة حرارته 80ºC، وأحرص أنْ تظلَّ درجة الحرارة في جميع الكؤوس ثابتة، مُستخدِمًا التسخين، أو الجليد إذا لزم ذلك.
4. أضع أنبوب الاختبار الذي يحمل الرقم (1) في الكأس الأولى، ثم أضع أنبوب الاختبار الذي يحمل الرقم (2) في الكأس الثانية، ثم أضع أنبوب الاختبار الذي يحمل الرقم (3) في الكأس الثالثة، مُراعِيًا ألّا تكون العلامة X ظاهرة لي؛ أيْ أنْ تكون على الجهة الأُخرى غير المُواجِهة لنظري.
5. **أُجرِّب:** أُضيف إلى كل أنبوب (5) mL من إنزيم التريبسين.
6. **أُلاحِظ** بقاء لون الحليب أو اختفاءه، ثم أحسُبُ الوقت المُستغرَق لظهور علامة X على أنابيب الاختبار في حال اختفاء لون الحليب، مُدوِّنًا ملاحظاتي.

التحليل والاستنتاج:

1. **أُصنِّف** الأنابيب إلى أنابيب ظهرت عليها علامة X، وأنابيب لم تظهر عليها هذه العلامة.
2. **أستنتج** درجة الحرارة المُثلى لعمل إنزيم التريبسين.
3. **أُفسِّر** سبب عدم ظهور علامة X على أحد أنابيب الاختبار.
4. **أتواصل:** أُناقِش زملائي/ زميلاتي في النتائج التي توصَّلْتُ إليها.

الربط بالنانو تكنولوجي

استخدام الإنزيمات المُستخلَصة من الفواكه الاستوائية في صناعة الخلايا الشمسية



تتطلَّب صناعة بعض الشرائح الرقيقة المُستخدَمة في الخلايا الشمسية توافر درجات حرارة مرتفعة، ومبالغ مالية كثيرة. ولتقليل درجات الحرارة اللازمة لذلك، طوَّر باحثون تقنية عضوية تتضمَّن صناعة شرائح نانوية رقيقة من مادة أكسيد التيتانيوم، مستفيدين في ذلك من خصائص الإنزيمات؛ إذ تمكَّنوا من استخلاص إنزيم البابايين من ثمار فاكهة البابايا الاستوائية، ثم استعملوه مع أكسيد التيتانيوم لإنتاج هذه الشرائح ذات المسامية الكبيرة؛ بُغْيَةَ استخدامها في صناعة الخلايا الشمسية.

العوامل المساعدة ومُرافِقات الإنزيمات Cofactors and Coenzymes

يتطلَّب عمل الإنزيمات في بعض التفاعلات توافر عوامل عديدة، تُسمّى العوامل المساعدة Cofactors. وفي حال كانت العوامل المساعدة للإنزيمات مواد عضوية، فإنَّها تُسمّى **مُرافِقات الإنزيمات Coenzymes**.

من الأمثلة على مُرافِقات الإنزيم: جزيئات (NAD^+) Nicotinamide Adenine Dinucleotide، وجزيئات Flavin Adenine Dinucleotide (FAD) التي تعمل بوصفها نواقل للإلكترونات في عديد من تفاعلات الأكسدة والاختزال في الخلية؛ إذ إنَّها تستقبل الإلكترونات ذات الطاقة الكبيرة مع البروتونات، فتُختزَل إلى NADH و $FADH_2$، ثم تتأكسد بفقدانها الإلكترونات إلى جزيئات أُخرى في سلسلة نقل الإلكترون في الغشاء الداخلي للميتوكندريا في أثناء عملية التنفُّس الخلوي، أنظر المعادلتين الآتيتين.

$$NAD^+ + 2H^+ + 2e^- \underset{\text{تأكسد}}{\overset{\text{اختزال}}{\rightleftharpoons}} NADH + H^+$$

$$FAD + 2H^+ + 2e^- \underset{\text{تأكسد}}{\overset{\text{اختزال}}{\rightleftharpoons}} FADH_2$$

من الأمثلة الأُخرى على مُرافِقات الإنزيم: جزيء $NADP^+$ Nicotinamide Adenine Dinucleotide Phosphate؛ وهو ناقل إلكترونات يُستخدَم في تفاعلات البناء، مثل عملية البناء الضوئي.

✓ **أتحقَّق:** أكتب معادلة اختزال جزيء NAD^+ إلى NADH.

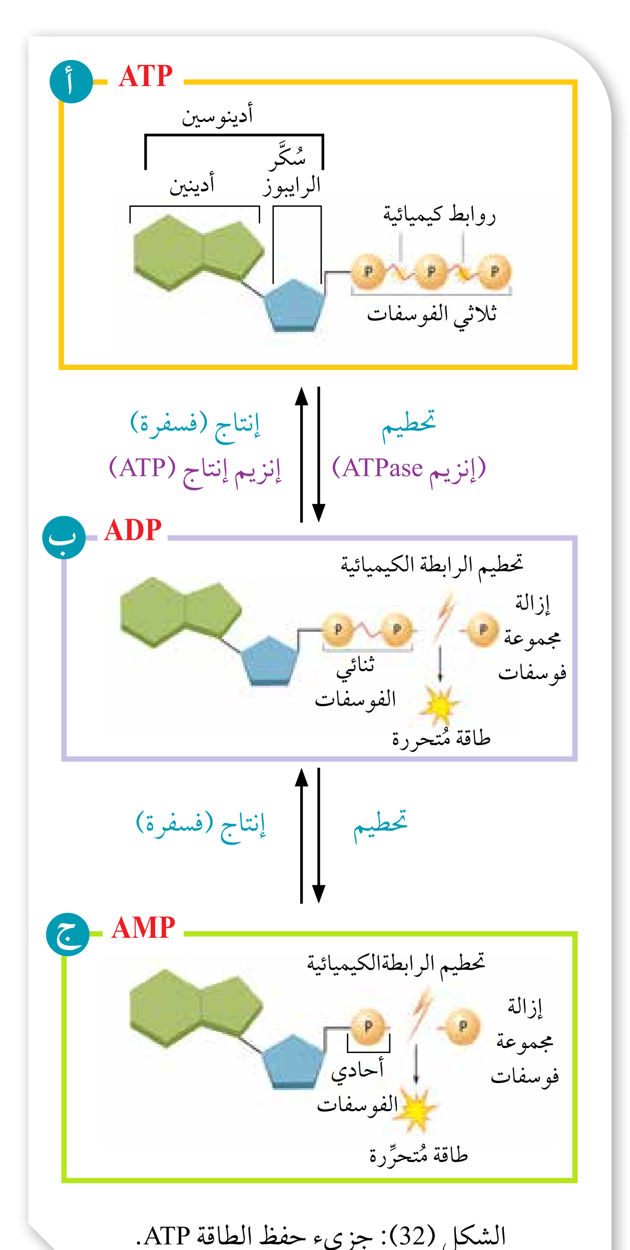
جزيء حفظ الطاقة Energy Storing Molecule ATP

تحتوي الخلايا على جزيء عضوي يُسمّى أدينوسين ثلاثي الفوسفات Adenosine Triphosphate (ATP)، وهو يُخزِّن الطاقة اللازمة لمعظم العمليات التي تحدث داخل خلايا الكائنات الحيَّة.

يتكوَّن جزيء حفظ الطاقة ATP من القاعدة النيتروجينية أدينين Adenine، وسُكَّر الرايبوز، وثلاث مجموعات من الفوسفات التي تُخزِّن الروابط بينها طاقة كيميائية، أنظر الشكل (32/ أ).

يُنتَج جزيء حفظ الطاقة ATP بفعل إنزيم إنتاج ATP Synthase ATP، عن طريق إضافة مجموعة فوسفات إلى جزيء أدينوسين ثنائي الفوسفات ADP في عملية تُسمّى الفسفرة، وبذلك تُخزَّن الطاقة الكيميائية في الرابطة بين مجموعتي الفوسفات. يُحفِّز عملية الفسفرة إنزيم إنتاج ATP في عمليتي التنفُّس الخلوي والبناء الضوئي. وعند تحطيم رابطة بين مجموعتي الفوسفات الثالثة والثانية بفعل إنزيم ATPase تتحرَّر الطاقة المُختزَنة فيها، فينتج جزيء أدينوسين ثنائي الفوسفات ADP ومجموعة فوسفات حُرَّة، أنظر الشكل (32/ ب).

أمّا عند تحطيم الرابطة بين مجموعتي الفوسفات الثانية والأولى، فتتحرَّر الطاقة المُختزَنة فيها، وينتج جزيء أدينوسين أُحادي الفوسفات AMP ومجموعة فوسفات حُرَّة، أنظر الشكل (32/ ج).

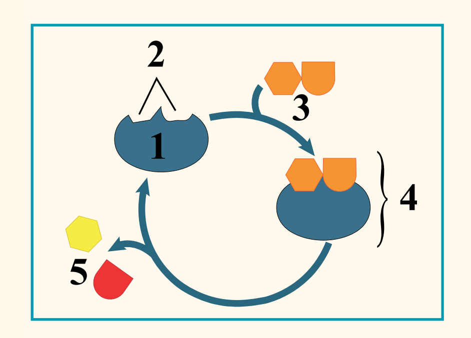


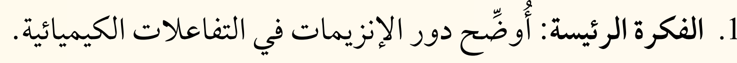
الشكل (32): جزيء حفظ الطاقة ATP.

أتحقَّق: كم مجموعة فوسفات تَلزم لتحويل جزيء AMP إلى جزيء ATP؟

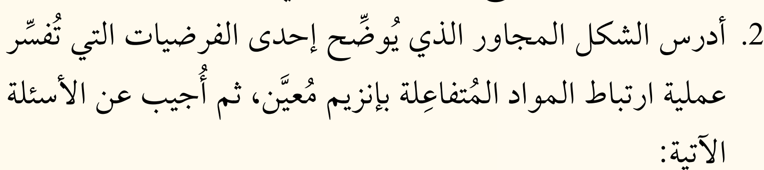
أُفكِّر: مِمَّ يتكوَّن الأدينوسين؟

مراجعة الدرس

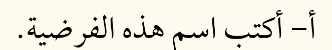




1. **الفكرة الرئيسة:** أُوضِّح دور الإنزيمات في التفاعلات الكيميائية.

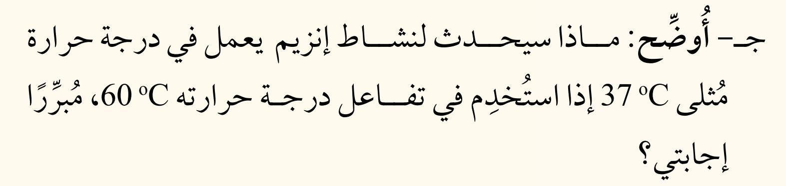


2. أدرس الشكل المجاور الذي يُوضِّح إحدى الفرضيات التي تُفسِّر عملية ارتباط المواد المُتفاعِلة بإنزيم مُعيَّن، ثم أُجيب عن الأسئلة الآتية:

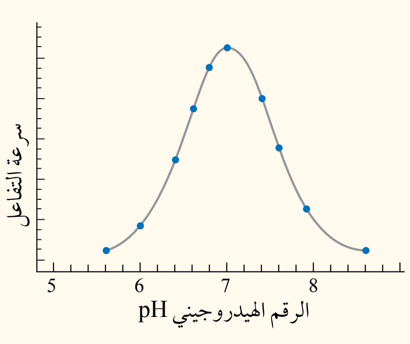


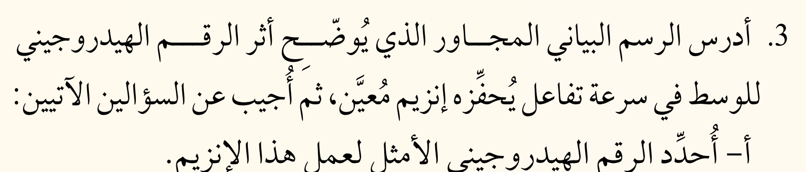
أ- أكتب اسم هذه الفرضية.

ب- أكتب اسم المفهوم الذي تشير إليه كلٌّ من الأرقام الآتية: (1)، (2)، (3)، (4)، (5).



جـ- **أُوضِّح:** مـاذا سيحـدث لنشـاط إنزيم يعمل في درجة حرارة مُثلى 37 °C إذا استُخدِم في تفـاعل درجة حرارته 60 °C، مُبرِّرًا إجابتي؟

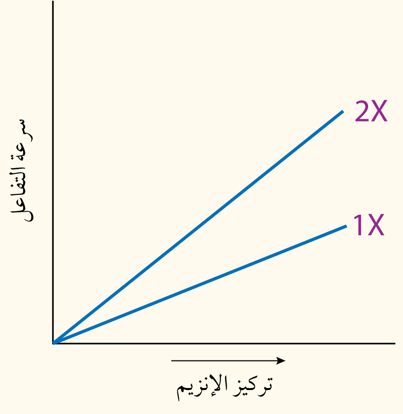


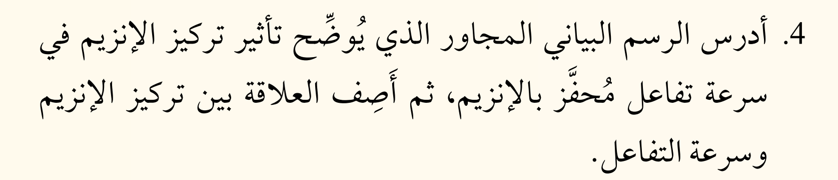


3. أدرس الرسم البياني المجـاور الذي يُوضّـح أثر الرقـم الهيدروجيني للوسط في سرعة تفاعل يُحفِّزه إنزيم مُعيَّن، ثم أُجيب عن السؤالين الآتيين:

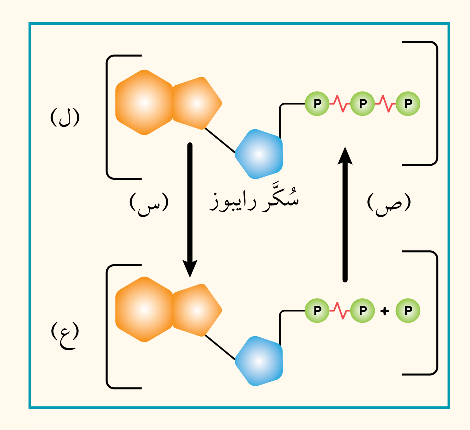
أ- أُحدِّد الرقم الهيدروجيني الأمثل لعمل هذا الإنزيم.

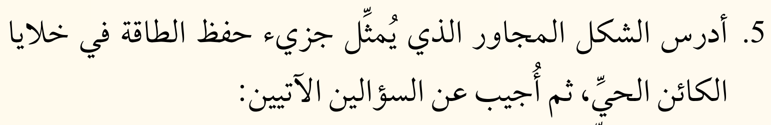
ب- **أستنتج:** كيف أعرف أنَّ هذا الإنزيم ليس إنزيم الببسين، مُبرِّرًا إجابتي؟





4. أدرس الرسم البياني المجاور الذي يُوضِّح تأثير تركيز الإنزيم في سرعة تفاعل مُحفَّز بالإنزيم، ثم أَصِف العلاقة بين تركيز الإنزيم وسرعة التفاعل.





5. أدرس الشكل المجاور الذي يُمثِّل جزيء حفظ الطاقة في خلايا الكائن الحيِّ، ثم أُجيب عن السؤالين الآتيين:

أ- ما اسم كلٍّ من الجزيء المشار إليه بالرمز (ل)، والجزيء المشار إليه بالرمز (ع)؟

ب- أُوضِّح ما يحدث في كلٍّ من العمليتين المشار إليهما بالرمز (س)، والرمز (ص)، ثم أذكر أسماء الإنزيمات المشاركة في كلٍّ منهما.



التفاعلات الكيميائية في الخلية

Chemical Reactions in the Cell

الفكرة الرئيسة:

تحدث داخل الخلايا المُكوِّنة لأجسام الكائنات الحيَّة تفاعلات كيميائية عِدَّة، منها ما يُخزِّن الطاقة في الروابط الكيميائية داخل المُركَّبات العضوية، ومنها ما يُحرِّر الطاقة المُخزَّنة اللازمة لأداء الأنشطة الحيوية.

نتاجات التعلُّم:

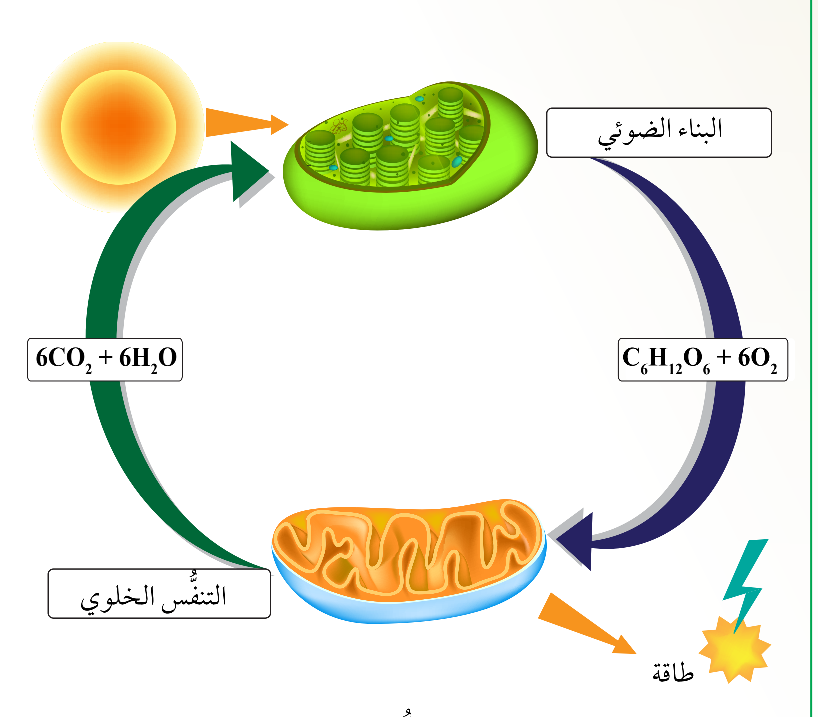
- أُفسِّر أهمية عمليات الأيض للكائنات الحيَّة.
- أُبيِّن أهمية بعض العمليات التي تحدث في الخلية، مثل: البناء الضوئي، والتنفُّس الخلوي.
- أستقصي آليَّة حدوث كلٍّ من عملية البناء الضوئي، وعملية التنفُّس الخلوي.
- أُقارِن بين عملية التنفُّس الهوائي وعملية التنفُّس اللاهوائي.

المفاهيم والمصطلحات:

التحلُّل الغلايكولي	Glycolysis
حلقة كربس	Krebs Cycle
الأسموزية الكيميائية	Chemiosmosis
الفسفرة التأكسدية	Oxidative Phosphorylation
التخمُّر	Fermentation
النظام الضوئي	Photosystem
حلقة كالفن	Calvin Cycle
البناء الكيميائي	Chemosynthesis

عمليات الأيض Metabolism

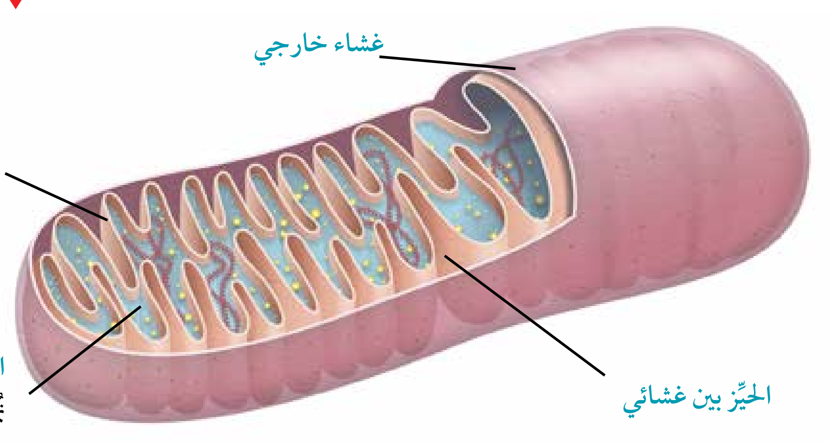
تحدث داخل خلايا الكائن الحيِّ آلاف التفاعلات الكيميائية التي تُعرَف بعمليات الأيض Metabolism، وتتضمَّن عمليات البناء Anabolism؛ وهي مجموعة التفاعلات الكيميائية التي تُبْنى فيها جزيئات كبيرة ومُعقَّدة من جزيئات بسيطة، مثل عملية البناء الضوئي، وعمليات الهدم Catabolism؛ وهي مجموعة التفاعلات الكيميائية التي تُحطَّم فيها بعض الجزيئات الكبيرة إلى جزيئات أبسط؛ لإنتاج الطاقة الكيميائية المُخزَّنة في روابطها، مثل عملية التنفُّس الخلوي، أنظر الشكل (33).



الشكل (33): التكامل بين عملية التنفُّس الخلوي وعملية البناء الضوئي.

أتحقَّق: فيمَ يستفاد من عمليات الهدم؟

الشكل (34): تركيب الميتوكندريا.



التنفُّس الخلوي Cellular Respiration

تحدث في عملية التنفُّس الخلوي سلسلة من التفاعلات، تشمل تحطيم المُركَّبات العضوية (مثل الغلوكوز) داخل الخلايا لإنتاج الطاقة. وتحدث معظم تفاعلات التنفُّس الخلوي في الخلايا حقيقية النوى في الميتوكندريا، أنظر الشكل (34).

تُمثَّل تفاعلات التنفُّس الخلوي بالمعادلة الآتية:

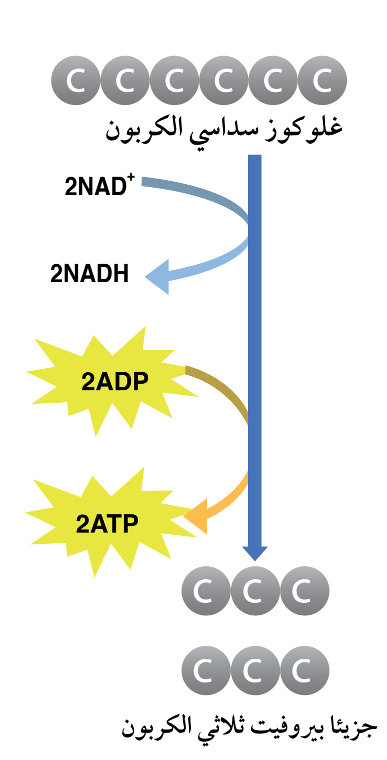
$$C_6H_{12}O_6 + 6O_2 \xrightarrow{\text{إنزيمات}} 6CO_2 + 6H_2O + Energy$$

(حرارة + ATP)

تحدث عملية التنفُّس الخلوي على مرحلتين، هما: مرحلة التحلُّل الغلايكولي (السُّكَّري) في السيتوسول، ومرحلة التنفُّس الهوائي في الميتوكندريا.

التحلُّل الغلايكولي Glycolysis

التحلُّل الغلايكولي Glycolysis: هو سلسلة من التفاعلات الكيميائية، تحدث في السيتوسول، ولا تحتاج إلى أكسجين. وفيها يتحطَّم كل جزيء غلوكوز إلى جزيئين من البيروفيت ثلاثي الكربون، ويُختزَل جزيئا NAD^+ إلى جزيئي NADH، وينتج جزيئا ATP، أنظر الشكل (35).



الشكل (35): التحلُّل الغلايكولي.

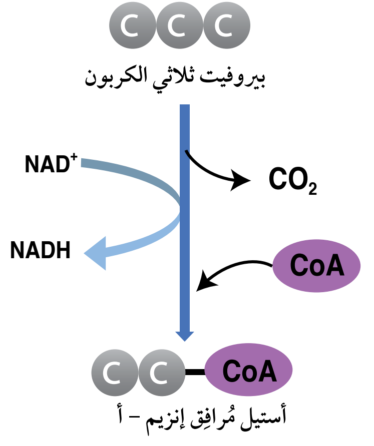
التنفُّس الهوائي Aerobic Respiration

عنـد توافـر الأكسـجين، فـإنَّ جزيئـي البيروفيـت ينتقـلان إلى حشـوة الميتوكندريـا.

تشـتمل عمليـة التنفُّـس الهوائـي عـلى ثـلاث خطـوات، هـي: أكسـدة البيروفيـت إلى أسـتيل مُرافِـق إنزيـم – أ، وحلقـة كربـس، والفسـفرة التأكسـدية.

أكسدة البيروفيت إلى أستيل مُرافِق إنزيم – أ

يُنتـزَع جـزيء CO_2 مـن البيروفيـت، فيتكـوَّن مُركَّـب ثنائـي الكربـون في الحشـوة. بعـد ذلـك يتأكسـد المُركَّـب ثنائـي الكربـون الناتـج مُختـزِلًا NAD^+ إلى NADH، ثـم يرتبـط بـه مُرافِـق إنزيـم - أ (CoA)، فينتـج أسـتيل مُرافِـق إنزيـم – أ (Acetyl CoA)، أنظـر الشـكل (36). يُذكَـر أنَّ هـذه الخطـوة تربـط بـين التحلُّـل الغلايكـولي وحلقـة كربـس.



الشـكل (36): أكسـدة جـزيء واحـد مـن البيروفيـت.
أُحـدِّد نواتـج أكسـدة جـزيء واحـد مـن البيروفيـت إلى أسـتيل مُرافِـق إنزيـم – أ.

أُفكِّر: كم عـــدد جزيئات أستيل مُرافِق إنزيم – أ التي تنتـــج مـــن جزيء غلوكوز؟

أتحقَّـق: ما نواتـــج أكسدة جزيئي بيروفيت؟

حلقة كربس Krebs Cycle

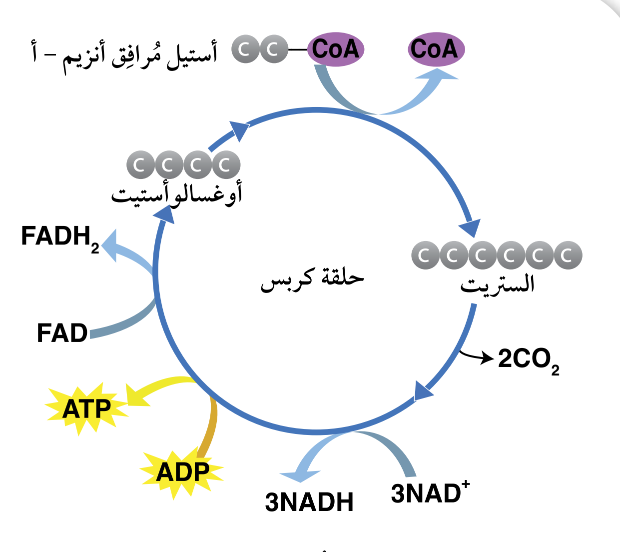
سُـمِّيت **حلقـة كربـس Krebs Cycle** بهـذا الاسـم نسـبةً إلى العـالِم الـذي أسـهمت بحوثه في اكتشـافها، وهي تُسـمّى أيضًا حلقة حمض السـتريك Citric Acid Cycle، وتحـدث في الحشـوة داخـل الميتوكندريـا.

تبـدأ حلقـة كربـس بتفاعـل أسـتيل مُرافِـق إنزيـم – أ ثنائـي الكربـون مع مُركَّـب رباعـي الكربـون يُسـمّى أوغسـالوأسـتيت Oxaloacetate، فينتج السـتريت Citrate (مُركَّـب سـداسي الكربـون)، ثم يدخل السـتريت في سلسـلة مـن التفاعـلات يفقـد خلالها جزيئـي CO_2، ليعـاد إنتـاج مُركَّـب أوغسالوأسـتيت.

في أثنـاء هـذه التفاعـلات تُختـزَل ثلاثـة جزيئـات مـن NAD^+ إلى NADH، ويُختـزَل جـزيء واحـد مـن FAD إلى $FADH_2$، وينتـج جـزيء واحـد مـن ATP بصـورة مباشـرة.

يُذكَـر أنَّـهُ يجـب أنْ تتـم دورتـان مـن حلقـة كربـس لـكلِّ جـزيء غلوكـوز، أنظـر الشـكل (37).

في مـا يـأتي تلخيـص لنواتـج تفاعـلات التحلُّـل الغلايكـولي، وتفاعـلات أكسـدة البيروفيـت إلى أسـتيل مُرافِـق إنزيـم – أ، والتفاعـلات التـي تحـدث في حلقـة كربـس لجـزيء غلوكـوز واحـد: (6) جزيئـات مـن CO_2، و(4) جزيئـات مـن ATP، و(10) جزيئـات مـن NADH، وجزيئان من $FADH_2$.



ملحوظة: الستريت هو الشكل المُتأيِّن لحمض الستريك.

الشكل (37): حلقة كربس لدورة واحدة. أُحدِّد نواتج دورتي حلقة كربس.

الفسفرة التأكسدية (سلسلة نقل الإلكترون والأسموزية الكيميائية)

Oxidative Phosphorylation (Electron Transport Chain and Chemiosmosis)

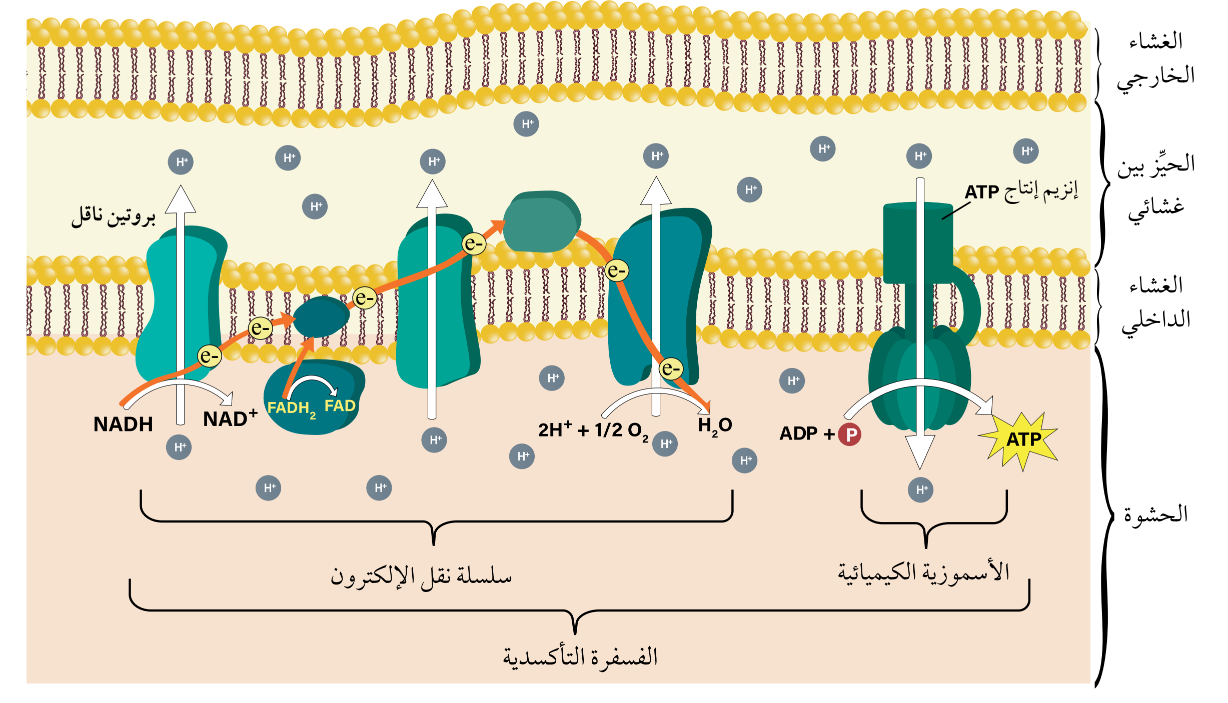
تتكوَّن سلسلة نقل الإلكترون من مجموعة من المكوِّنات، معظمها بروتينات ناقلة وإنزيمات. تستقبل هذه السلسلة الإلكترونات الناتجة من أكسدة NADH و $FADH_2$، ثم تنقلها من بروتين ناقل إلى آخر. وفي نهاية السلسلة، تصل هذه الإلكترونات إلى مُستقبِلها النهائي، وهو الأكسجين، ثم تتحد معه ومع البروتونات؛ فيتكوَّن الماء.

يؤدي انتقال الإلكترونات من NADH و $FADH_2$ إلى الأكسجين خلال سلسلة نقل الإلكترون إلى ضَخِّ البروتونات (H^+) من الحشوة إلى الحيِّز بين غشائي، فينتج فرق في تركيز البروتونات بين الحيِّز بين غشائي والحشوة.

بعد ذلك تعود البروتونات (H^+) نتيجةً لفرق التركيز على جانبي غشاء الميتوكندريا الداخلي إلى داخل الحشوة عن طريق إنزيم إنتاج ATP Synthase ATP في عملية تُسمّى **الأسموزية الكيميائية Chemiosmosis**، وتحدث فيها فسفرة جزيئات ADP إلى ATP.

يُطلَق على عملية إنتاج ATP عن طريق سلسلة نقل الإلكترون والأسموزية الكيميائية اسم **الفسفرة التأكسدية Oxidative Phosphorylation**، أنظر الشكل (38).

أستخدم برمجية movie maker لتمثيل حركة البروتونات (H^+) من الحشوة إلى الحيِّز بين غشائي في أثناء عملية الفسفرة التأكسدية، وإحداث فرق في تركيز البروتونات بين الحيِّز بين غشائي والحشوة، ثم عودة البروتونات نتيجة فرق التركيز على جانبي غشاء الميتوكندريا الداخلي (إلى داخل الحشوة) عن طريق إنزيم إنتاج ATP synthase ATP في عملية الأسموزية الكيميائية، ثم أعرضه أمام زملائي/ زميلاتي في الصف.



الشكل (38): الفسفرة التأكسدية.

يُسهِم كل جزيء من NADH في إنتاج (2.5) جزيء من ATP ، في حين يُسهِم كل جزيء من $FADH_2$ في إنتاج (1.5) جزيء من ATP.

ملحوظة: يُعتمَد الآتي لتسهيل العمليات الحسابية:

عدد جزيئات ATP التي يُسهِم جزيء NADH في إنتاجها هو (3)، وعدد جزيئات ATP التي يُسهِم جزيء $FADH_2$ في إنتاجها هو (2).

مثال

أحسُبُ عدد جزيئات ATP الناتجة من الفسفرة التأكسدية عند أكسدة جزيء واحد من الغلوكوز.

المعطيات:

عدد جزيئات الغلوكوز التي تأكسدت هو جزيء واحد.

الحل:

عدد جزيئات NADH الناتجة من التحلُّل الغلايكولي هو (2)، وعدد جزيئات NADH الناتجة من أكسدة حمض البيروفيت إلى أستيل مُرافِق إنزيم - أ هو (2)، وعدد جزيئات NADH الناتجة من دورتي حلقة كربس هو (6)، فيكون المجموع (10) جزيئات NADH، وعدد جزيئات $FADH_2$ الناتجة من تفاعلات دورتي حلقة كربس هو (2).

بما أنَّ كل جزيء NADH يُسهِم في إنتاج (3) جزيئات ATP، وكل جزيء $FADH_2$ يُسهِم في إنتاج جزيئي ATP، فإنَّ عدد جزيئات ATP الناتجة من عملية الفسفرة التأكسدية هو:

$(2x2) + (10 \times 3) = (34)$ جزيئًا.

أتحقَّق: أُحدِّد مكان حدوث العمليات الآتية في الخلية: التحلُّل الغلايكولي، أكسدة البيروفيت إلى مُرافِق إنزيم - أ، حلقة كربس، الفسفرة التأكسدية.

التنفُّس اللاهوائي والتخمُّر Anaerobic Respiration and Fermentation

تعمل بعض الخلايا على أكسدة المواد العضوية وإنتاج الطاقة ATP، من دون استخدام الأكسجين، عن طريق التنفُّس اللاهوائي، والتخمُّر. تحدث عمليتا التنفُّس اللاهوائي والتخمُّر في السيتوسول.

التنفُّس اللاهوائي Anaerobic Respiration

يلجأ إلى هذا النوع من التنفُّس بعضُ أنواع البكتيريا؛ إذ تَستخدم هذه الكائنات سلسلة نقل الإلكترون، ولكنَّها لا تستخدم الأكسجين مُستقبِلًا نهائيًّا للإلكترونات. ومن الأمثلة عليها: بكتيريا اختزال الكبريتات التي

تعيش في بيئة تخلو من الأكسجين، وتَستخدم الكبريتات مُستقبِلًا نهائيًا للإلكترونات، فينتج كبريتيد الهيدروجين H_2S (مُركَّب غير عضوي).

التخمُّر Fermentation

تحدث عملية **التخمُّر Fermentation** في السيتوسول عند عدم توافر كمِّيات كافية من الأكسجين، وتبدأ بالتحلُّل الغلايكولي، ثم تنتقل الإلكترونات من NADH إلى البيروفيت (أو أحد مشتقاته) بوصفه مُستقبِلًا نهائيًا للإلكترونات؛ ليعاد استخدام NAD^+ في التحلُّل الغلايكولي.

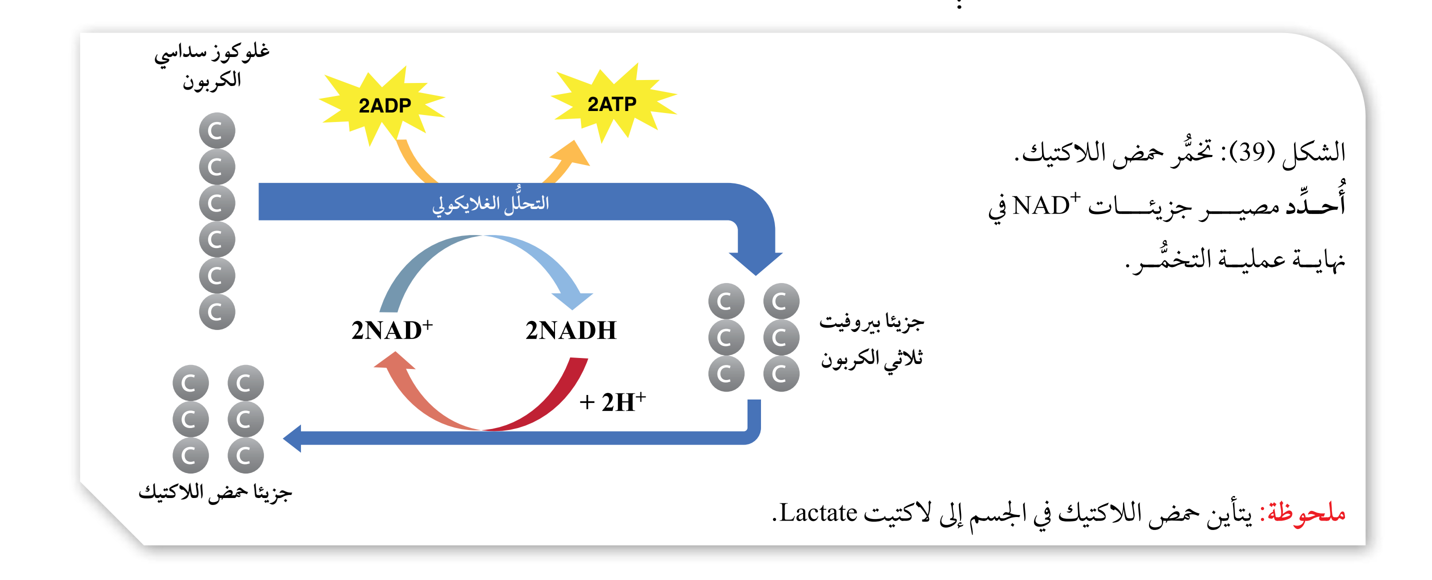
توجد أنواع عِدَّة من التخمُّر تُصنَّف بناءً على الناتج النهائي من العملية، مثل: تخمُّر حمض اللاكتيك، والتخمُّر الكحولي.

تخمُّر حمض اللاكتيك (التخمُّر اللبني) Lactic Acid Fermentation

تعمل أنواع من البكتيريا وبعض الفطريات على تحويل البيروفيت إلى حمض اللاكتيك، في ما يُعرَف باسم تخمُّر حمض اللاكتيك. وكذلك تلجأ العضلات الهيكلية إلى هذه العملية عند عدم توافر كمِّيات كافية من الأكسجين.

يتنتج من تفاعلات تخمُّر جزيء واحد من الغلوكوز إلى حمض اللاكتيك جزيئان من ATP، وجزيئان من حمض اللاكتيك، أنظر الشكل (39).

أتحقَّق: أُقارِن بين التنفُّس اللاهوائي وعملية التخمُّر من حيث المُستقبِل النهائي للإلكترونات.



الشكل (39): تخمُّر حمض اللاكتيك.
أُحدِّد مصير جزيئات NAD^+ في نهاية عملية التخمُّر.

ملحوظة: يتأين حمض اللاكتيك في الجسم إلى لاكتيت Lactate.

استفاد الإنسان من البكتيريا والفطريات التي تُحوِّل البيروفيت إلى حمض اللاكتيك في صناعة الألبان والأجبان؛ إذ تُحلِّل هذه البكتيريا سُكَّر اللاكتوز في الحليب، ثم تُحوِّله إلى حمض اللاكتيك، فيتحوَّل الحليب إلى لبن، أنظر الشكل (40).



الشكل (40): صناعة اللبن.

التخمُّر الكحولي Alcoholic Fermentation

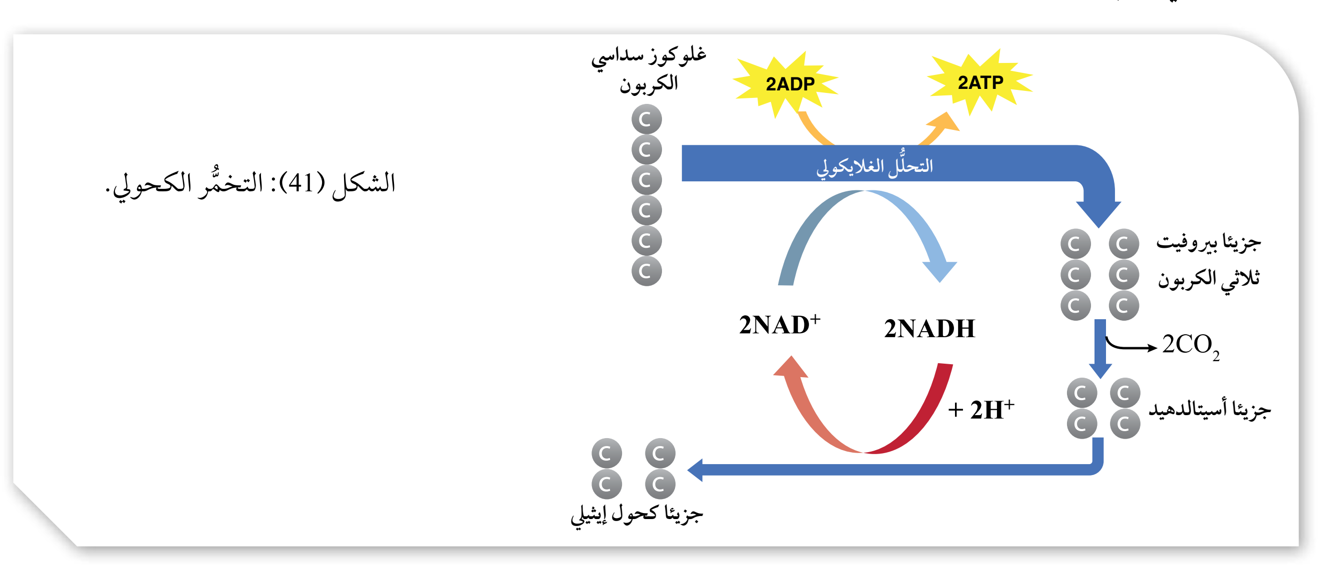
يعمل فطر الخميرة وبعض أنواع البكتيريا اللاهوائية على تحويل البيروفيت إلى كحول إيثيلي Ethanol.

يتحوَّل البيروفيت إلى مُركَّب ثنائي الكربون يُسمّى أسيتالدهيد، فيتحرَّر غاز ثاني أكسيد الكربون CO_2، ثم يُختزَل الأسيتالدهيد إلى كحول إيثيلي، أنظر الشكل (41).

أتحقَّق:

أ- أُحدِّد عدد جزيئات CO_2 الناتجة من عملية التخمُّر الكحولي لكل جزيء من الغلوكوز.

ب- أُحدِّد أوجه التشابه والاختلاف بين عمليتي التخمُّر في كلٍّ من الخميرة وإحدى الخلايا العضلية.



الشكل (41): التخمُّر الكحولي.

تُستخـــــدَم الخمـيرة في إعـــداد المُعجِّنـات؛ إذ يعمـــل غـاز ثـاني أكسيد الكربـون المُتحـرِّر مـن عملية التخمُّـر الكحـولي عـلى زيـادة حجـم العجـين، أنظـر الشـكل (42).



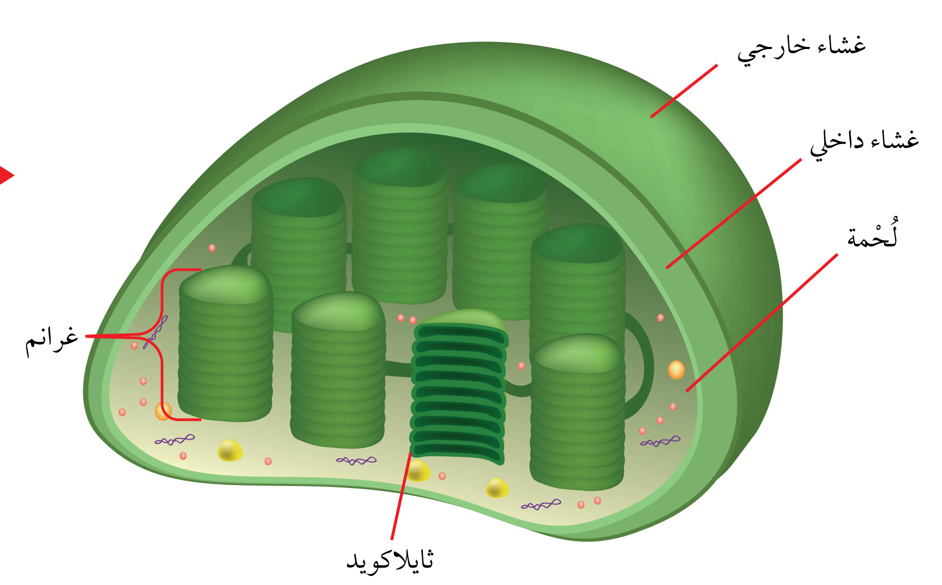
الشكل (42): زيادة حجم العجين.

البناء الضوئي Photosynthesis

تحـدث في عمليـة البنـاء الضوئـي سلسـلة مـن التفاعـلات، تشـمل امتصـاص الطاقـة الضوئيـة، ثـم تحويلهـا إلى طاقـة كيميائيـة تُختـزَن في المُركَّبـات العضويـة. يُمكِـن تمثيـل هـذه العمليـة بالمعادلـة الكيميائيـة الآتيـة:

$$6CO_2 + 6H_2O \xrightarrow[\text{إنزيمات}]{\text{ضوء + صبغة كلوروفيل}} C_6H_{12}O_6 + 6O_2$$

تحـدث عمليـة البنـاء الضوئـي في البلاسـتيدات الخـضراء؛ وهـي عُضَيّـات تحـوي غشـاءين (داخـلي، وخارجـي) يحيطـان بالثايلاكويـدات Thylakoids؛ وهـي مجموعـة مـن الأكيـاس الغشـائية عـلى هيئـة أقـراص يترتَّـب بعضهـا فـوق بعـض، وتُسـمّى الغرانـا Grana (مفردهـا غرانـم Granum)، وتمتلـئ الفراغـات المحيطـة بهـا بسـائل كثيـف يُسـمّى اللُّحْمـة Stroma، أنظـر الشـكل (43).

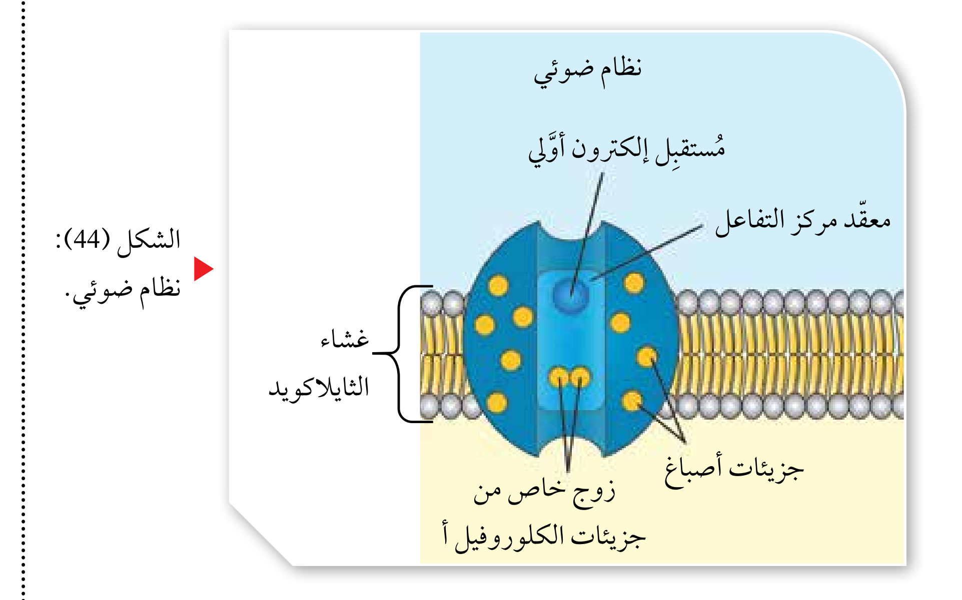


الشكل (43): بلاستيدة خضراء. تحتـوي أغشـية الثـايلاكويدات عـلى الكلوروفيـل، وأصباغ أُخرى، وبعـض الإنزيـمات، ونـواقل للإلكترونات.

النظامان الضوئيان الأوَّل والثاني Photosystems: I and II

تحتوي أغشية الثايلاكويدات على **نظامين ضوئيين Photosystems**، هما: النظام الضوئي الأوَّل PS I، والنظام الضوئي الثاني PS II.

يتكوّن النظام الضوئي من معقّد مركز تفاعل Reaction Center Complex يحتوي على زوج خاص من الكلوروفيل أ، ومُستقبِل إلكترون أوَّلي Primary Electron Acceptor. ويحاط معقّد مركز التفاعل بأصباغ أُخرى، مثل: الكلوروفيل ب، والكاروتين، أنظر الشكل (44).



الشكل (44): نظام ضوئي.

أتحقَّق:

- علامَ يحتوي معقَّد مركز التفاعل في النظام الضوئي؟
- ما سبب تسمية كلٍّ من النظام الضوئي الأوَّل P700، والنظام الضوئي الثاني P680 بهذا الاسم؟

يُعرَف النظام الضوئي الأوَّل بـ P700؛ لأنَّ الكلوروفيل أ في معقّد مركز التفاعل يمتص الضوء الذي طوله الموجي 700 نانومتر بأقصى فاعلية. أمّا النظام الضوئي الثاني فيُعرَف بـ P680؛ لأنَّ الكلوروفيل أ يمتص الضوء الذي طوله الموجي 680 نانومترًا بأقصى فاعلية.

مراحل عملية البناء الضوئي

تمرُّ عملية البناء الضوئي بمرحلتين، هما: التفاعلات الضوئية Light Reactions التي تعتمد على الضوء، وتحدث في أغشية الثايلاكويدات. والتفاعلات التي لا تعتمد على الضوء (تُسمّى أيضًا حلقة كالفن Calvin Cycle)، وتحدث في اللُّحْمة.

التفاعلات الضوئية Light Reactions

تُصنَّف التفاعلات الضوئية إلى مسارين، هما: مسار التفاعلات الضوئية اللاحلقية، ومسار التفاعلات الضوئية الحلقية.

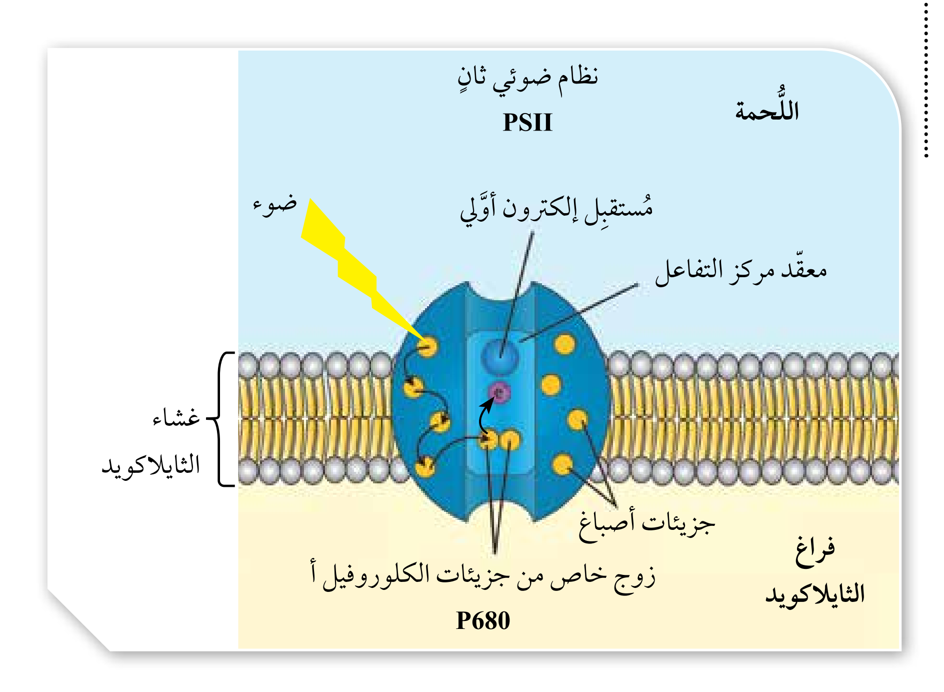
مسار التفاعلات الضوئية اللاحلقية Non Cyclic Light Reactions Pathway

يُشارِك النظام PSI و النظام PSII في التفاعلات الضوئية اللاحلقية؛ إذ تمتص جزيئات الصبغة الطاقة الضوئية وتستخدمها في استثارة الإلكترونات في كلٍّ من النظامين.

تبدأ التفاعلات الضوئية اللاحلقية بامتصاص جزيء صبغة واحد في النظام الضوئي الثاني PSII الطاقة الضوئية، فيستثار إلكترون فيه، وينتقل إلى مستوى طاقة أعلى.

تُمرَّر هذه الطاقة من جزي صبغة إلى آخر حتى تصل إلى زوج الكلوروفيل أ في معقَّد مركز التفاعل الثاني P680، فيستثار إلكترون فيه. ونظرًا إلى امتلاك زوج الكلوروفيل أ مقدرة خاصة على نقل الإلكترونات إلى جزيء مختلف؛ فإنَّ هذا الإلكترون المستثار ينتقل إلى مُستقبِل الإلكترون الأوَّلي في النظام الضوئي، أنظر الشكل (45).

يعمل إنزيم على تحلُّل الماء في فراغ الثايلاكويد، وينتج من تحلُّل كل جزيء ماء إلكترونان، وبروتونان ($2H^+$)، وذرَّة أكسجين، فتُعوِّض الإلكترونات الناتجة من تحلُّل الماء الإلكترونات التي فقدها زوج الكلوروفيل أ من معقّد مركز التفاعل في PSII. أمّا ذرَّة الأكسجين الناتجة من تحلُّل الماء،



الشكل (45): امتصاص الضوء في النظام الضوئي الثاني.

أفكِّر: لماذا يُطلَق على مسار التفاعلات الضوئية الذي يشترك فيه النظام PSI والنظام PSII اسم التفاعلات اللاحلقية؟

الربط بالفيزياء

قانون حفظ الطاقة

وَفقًا لقانون حفظ الطاقة، فإنَّ الطاقة لا تفنى، ولا تُستحدَث من العدم، لكنَّها تتحوَّل من صورة إلى أُخرى.

أُلاحِظ تحوُّلات الطاقة من طاقة ضوئية إلى طاقة تمتلكها الإلكترونات المستثارة، ومنها إلى طاقة كيميائية تُختزَن في جزيئات ATP.

فإنَّها تتحد مع ذرَّة أكسجين أُخرى ناتجة من تحلُّل جزيء آخر من الماء، فيتشكَّل جزي أكسجين، أنظر الشكل (46/ أ).

تنطلق الإلكترونات من مُستقبِل الإلكترون الأوَّلي في النظام الضوئي الثاني إلى النظام الضوئي الأوَّل خلال سلسلة نقل الإلكترون Electron Transport Chain التي تتكوَّن من نواقل للإلكترونات، أهمها السيتوكرومات. وفي أثناء انتقالها، تفقد هذه الإلكترونات جزءًا من طاقتها، ويُستخدَم هذا الجزء من الطاقة في نقل البروتونات (H^+) من اللُّحْمة إلى فراغ الثايلاكويد، فينتج فرق في تركيز البروتونات بين فراغ الثايلاكويد واللُّحْمة، أنظر الشكل (46/ أ، ب).

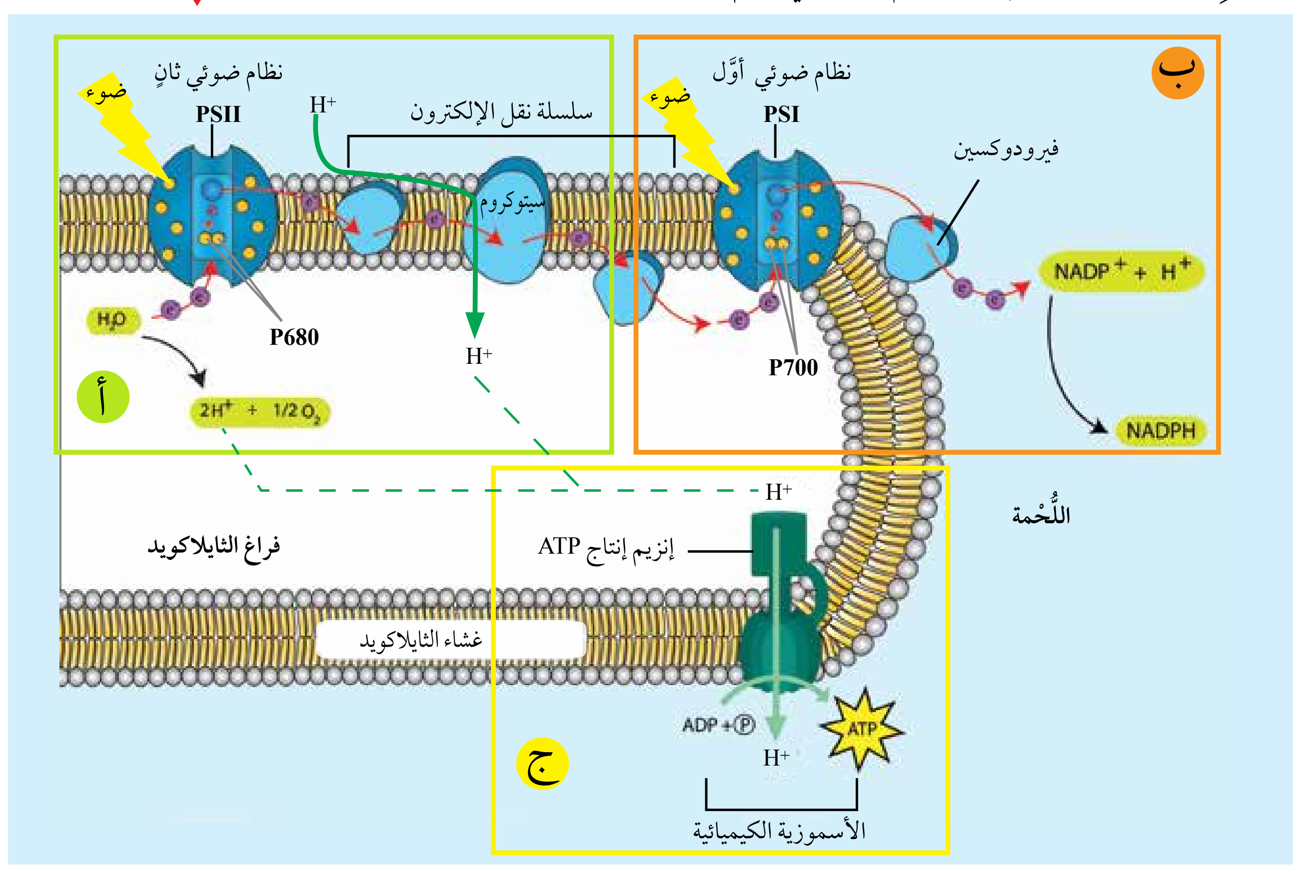
وبصورة مُشابِهة، يمتص جزيء صبغة واحد في النظام الضوئي الأوَّل PSI الطاقة الضوئية، فيستثار إلكترون فيه، وينتقل إلى مستوى طاقة أعلى.

تُمرَّر هذه الطاقة من جزي صبغة إلى آخر حتى تصل الطاقة إلى زوج الكلوروفيل أ في معقّد مركز التفاعل في النظام الضوئي الأوَّل، فيستثار إلكترون فيه. ونظرًا إلى امتلاك زوج الكلوروفيل أ مقدرة خاصة على نقل الإلكترونات إلى جزيء مختلف؛ فإنَّ هذا الإلكترون المستثار ينتقل إلى مُستقبِل الإلكترون الأوَّلي في النظام الضوئي، ثم تنتقل هذه الإلكترونات

أتحقَّق: ما مصدر الإلكترونات التي تُعوِّض الإلكترونات المفقودة من النظام الضوئي الأوَّل والنظام الضوئي الثاني؟

الشكل (46): التفاعلات الضوئية اللاحلقية.

ما المُستقبِل النهائي للإلكترونات في التفاعلات اللاحلقية؟



مـن مُسـتقبِل الإلكـترون الأوَّلي في هـذا النظـام (أيِ النظـام الضوئـي الأوَّل) عبر سلسـلة نقـل إلكـترون أُخـرى وبروتـين فيرودوكسـين، لتصـل إلى مُسـتقبِلها النهائـي، وهـو $NADP^+$، فيُختـزَل باسـتخدام هـذه الإلكترونـات والبروتونـات الموجـودة في اللُّحْمـة إلى NADPH، أنظـر الشـكل (46/ ب).

يُذكَـر أنَّ الإلكترونـات المفقـودة مـن زوج الكلوروفيـل أ في النظـام الضوئي الأوَّل إلى مُسـتقبِل الإلكـترون الأوَّلي فيهـا تُعـوَّض عـن طريـق الإلكترونـات التـي انتقلـت إليهـا مـن النظـام الضوئـي الثـاني.

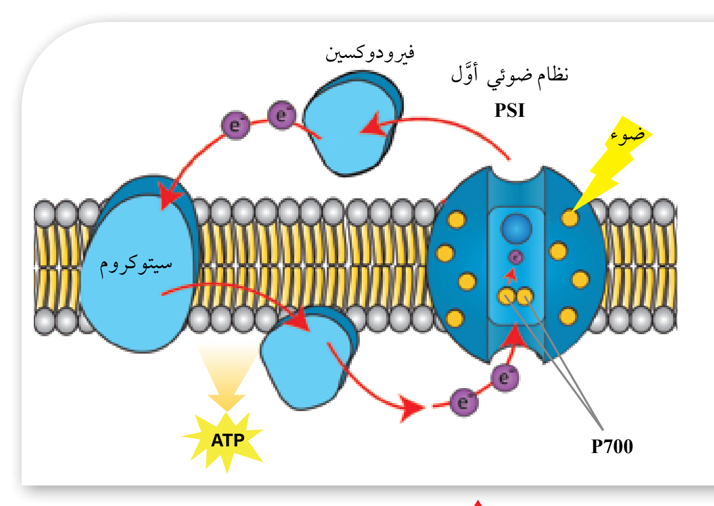
تعودُ البروتونات (H^+) من فـراغ الثايلاكويد إلى اللُّحمة نتيجة لفرق التركيز بينهما عن طريق إنزيم إنتاج ATP في عملية الأسموزية الكيميائية، وتحدث فيها فسفرة جزيئات ADP إلى ATP، أنظر الشكل (46/ ج).

يُذكَـر أنَّ نواتـج التفاعـلات الضوئيـة ATP وNADPH تُسـتخدَم في حلقـة كالفـن لاحقًا.

أتحقَّـق: أُقـارِن بـين مصـير الإلكـترونات المُنطلِقـة مـن معقّـد مركـز التفاعـل في كلٍّ مـن التفاعـلات الضوئيـة اللاحلقيـة، والتفاعـلات الضوئيـة الحلقيـة.

مسار التفاعلات الضوئية الحلقية Cyclic Light Reactions Pathway

تحـدث التفاعـلات الضوئيـة الحلقيـة في النظـام الضوئـي الأوَّل فقـط لإنتـاج ATP. وفيهـا تـسري الإلكترونـات المسـتثارة بفعـل الضـوء مـن P700 إلى مُسـتقبِل الإلكـترون الأوَّلي، ثـم إلى بروتـين الفيرودوكسـين، ثـم تعـود مَـرَّةً أُخـرى عـبر السـيتوكروم إلى P700 في النظـام الضـوئي الأوَّل الـذي انطلقـت منـه؛ لـذا أُطلِـق عـلى هـذه التفاعـلات اسـم التفاعـلات الحلقيـة، وهـي تعمـل فقـط عـلى إنتـاج ATP الـذي يُسـتخدَم في حلقـة كالفـن، أنظـر الشـكل (47).



الشـكل (47): التفاعـلات الضوئيـة الحلقيـة.

حلقة كالفن Calvin Cycle

تحـدث تفاعـلات حلقـة كالفـن في اللُّحْمـة؛ إذ تحتـوي اللُّحْمـة على المـواد والإنزيـمات اللازمـة لحدوثها.

تُمثِّل هذه المرحلة مرحلة التصنيع التي تُستخدَم فيها نواتج التفاعلات الضوئية ATP وNADPH لإنتاج مُركَّبات عضوية.

تمـرُّ تفاعـلات حلقـة كالفـن بثـلاث مراحـل، هـي: مرحلـة تثبيـت الكربـون، ومرحلـة الاختـزال، ومرحلـة إعـادة تكويـن مُسـتقبِل ثـاني أكسـيد الكربـون، أنظـر الشـكل (48) الـذي يبـيّن هـذه المراحـل، ويُلخِّـص ثـلاث دورات مـن حلقـة كالفـن.

1- مرحلة تثبيت الكربون Carbon Fixation Phase

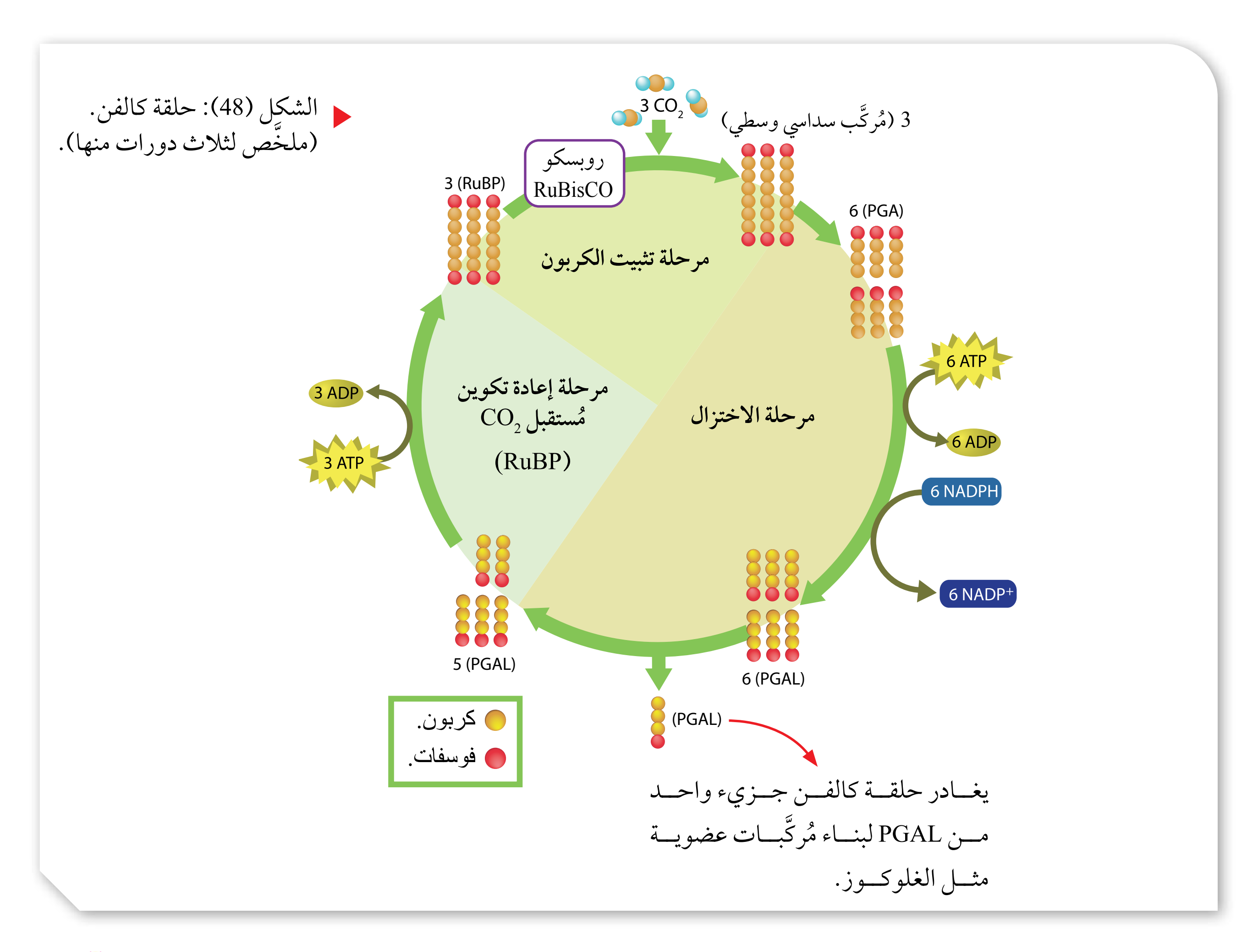
يربط إنزيم يُسمّى روبسكو RuBisCO (3) جزيئات من CO_2 بـ (3) جزيئات من مُستقبل CO_2 وهو السُّكَّر الخماسي ريبيولوز ثنائي الفوسفات RuBP، فتنتج (3) جزيئات من مُركَّب سداسي وسطي غير مستقر، لا يلبث أنْ ينشطر كلٌّ منها إلى جزيئين من مُركَّب ثلاثي الكربون يُسمّى حمض الغليسرين أُحادي الفوسفات PGA. يُطلَق على عملية ربط CO_2 بالسُّكَّر الخماسي اسم تثبيت الكربون.

2- مرحلة الاختزال Reduction Phase

في هذه المرحلة يُختزَل كل جزيء من حمض الغليسرين أُحادي الفوسفات PGA إلى غليسر ألدهيد أُحادي الفوسفات Phosphoglyceraldehyde (PGAL) باستخدام طاقة (6) جزيئات ATP و(6) جزيئات NADPH، فيكون الناتج (6) جزيئات غليسر ألدهيد أُحادي الفوسفات PGAL. يغادر حلقة كالفن جزيء واحد من PGAL لبناء مُركَّبات عضوية مثل الغلوكوز.

3- مرحلة إعادة تكوين مُستقبِل CO_2 (ريبيولوز)
Regeneration of CO_2 Acceptor Phase (RuBP)

تدخل (5) جزيئات PGAL المُتبقِّية في سلسلة التفاعلات المُعقَّدة لإعادة تكوين (3) جزيئات من السُّكَّر الخماسي ريبيولوز RuBP من جديد. ويُستهلَك في أثناء ذلك (3) جزيئات ATP.



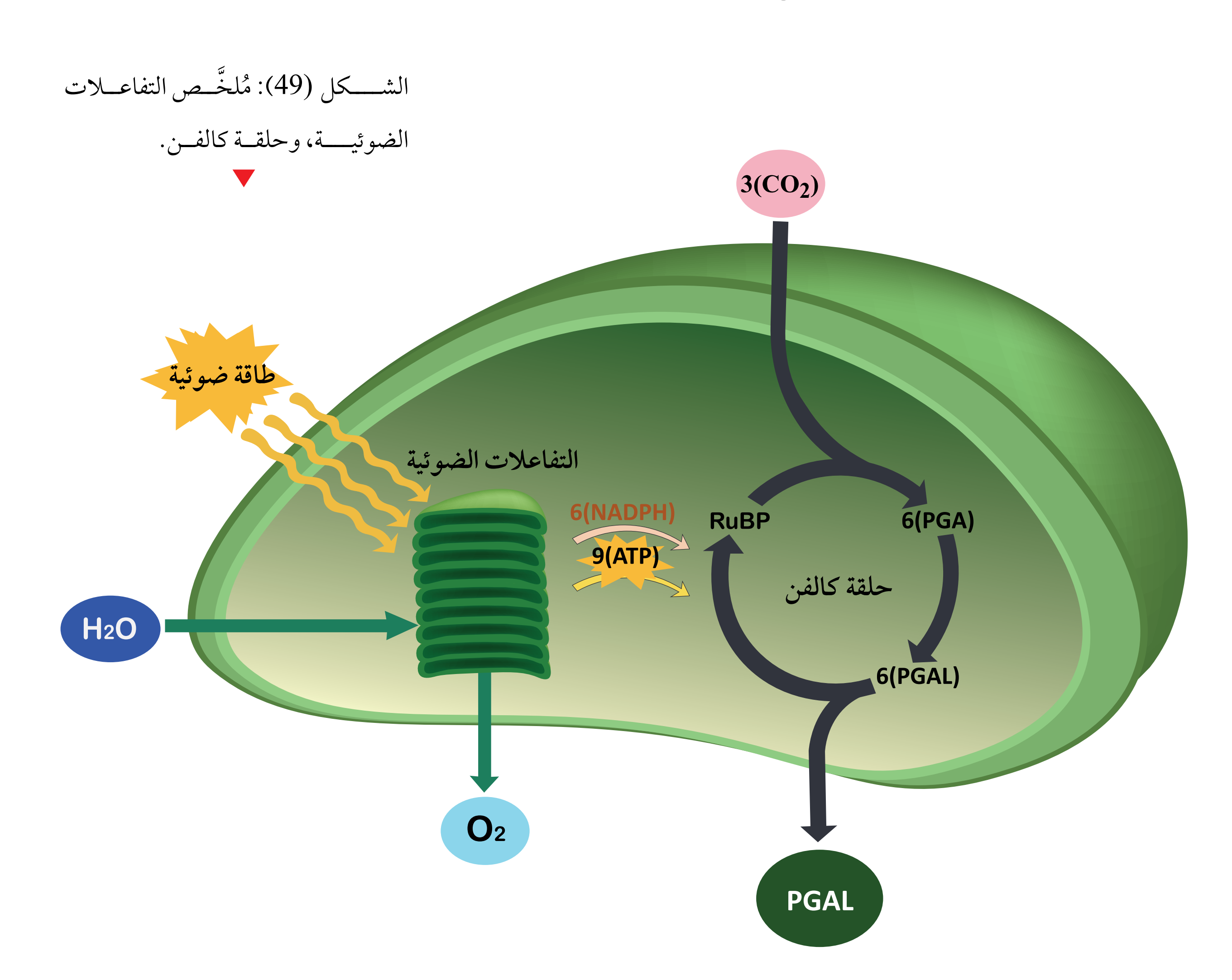
الشكل (48): حلقة كالفن. (ملخَّص لثلاث دورات منها).

في ما يأتي تلخيص للتفاعلات الضوئية وحلقة كالفن، أنظر الشكل (49).

التفاعلات الضوئية (تعتمد على الضوء):

- تُستخدَم فيها الطاقة الضوئية.
- يُستهلَك الماء.
- يتحلَّل كل جزيء من الماء إلى $2H^+$ و $2e^-$ و $\frac{1}{2}$ O_2 .
- ينتج O_2.

الشكل (49): مُلخَّص التفاعلات الضوئية، وحلقة كالفن.



حلقة كالفن (لا تعتمد على الضوء):

لإنتاج جزيء PGAL يغادر حلقة كالفن:

- تُستهلَك (3) جزيئات CO_2.
- تُستهلَك (9) جزيئات ATP.
- تُستهلَك (6) جزيئات NADPH.

لإنتاج جزيء غلوكوز: يتحد (2) جزيء PGAL.



مثال

إذا كان عدد جزيئات ATP المُستهلَكة في أثناء تفاعلات حلقة كالفن هو (36) جزيئًا، فأُجيب عن الأسئلة الآتية:

1 – كم عدد جزيئات PGAL النهائية الناتجة (التي ستغادر حلقة كالفن)؟

2 – كم عدد جزيئات NADPH المُستهلَكة؟

3 – كم عدد جزيئات الغلوكوز الناتجة؟

المعطيات:

عدد جزيئات ATP المُستهلَكة في حلقة كالفن هو (36) جزيئًا.

الحل:

1- تُستهلَك (9) جزيئات ATP لإنتاج جزيء PGAL يغادر حلقة كالفن.
إذن، إذا استُهلِك (36) جزيئًا من ATP فسينتُج (4) جزيئات PGAL نهائية.

2- تُستهلَكُ (6) جزيئات من NADPH لإنتاج جزيء PGAL يغادر حلقة كالفن.
إذن، عدد جزيئات NADPH المُستهلَكة لإنتاج (4) جزيئات PGAL: $4 \times 6 = (24)$ جزيئًا.

3- ينتج جزيء واحد من الغلوكوز من اتحاد جزيئين من PGAL.
إذن، عدد جزيئات الغلوكوز الناتجة من (4) جزيئات PGAL: $\frac{4}{2} = (2)$ جزيئًا.

أتحقَّق:

أ – أدرس الجدول الآتي الذي يُمثِّل الجزيئات التي تُستهلَك في تفاعلات حلقة كالفن لإنتاج جزيء واحد من الغلوكوز، ثم أكتب العدد اللازم من كل جزيء ورد ذكره في الجدول لإتمام هذه التفاعلات.

الجزيئات	CO_2	ATP	NADPH
العدد اللازم		18	

ب– أحسُبُ عدد ذَرّات الكربون في (5) جزيئات من PGAL، ثم أربط بينها وبين عدد ذَرّات الكربون في (3) جزيئات من السُّكَّر الخماسي ريبيولوز ثنائي الفوسفات.



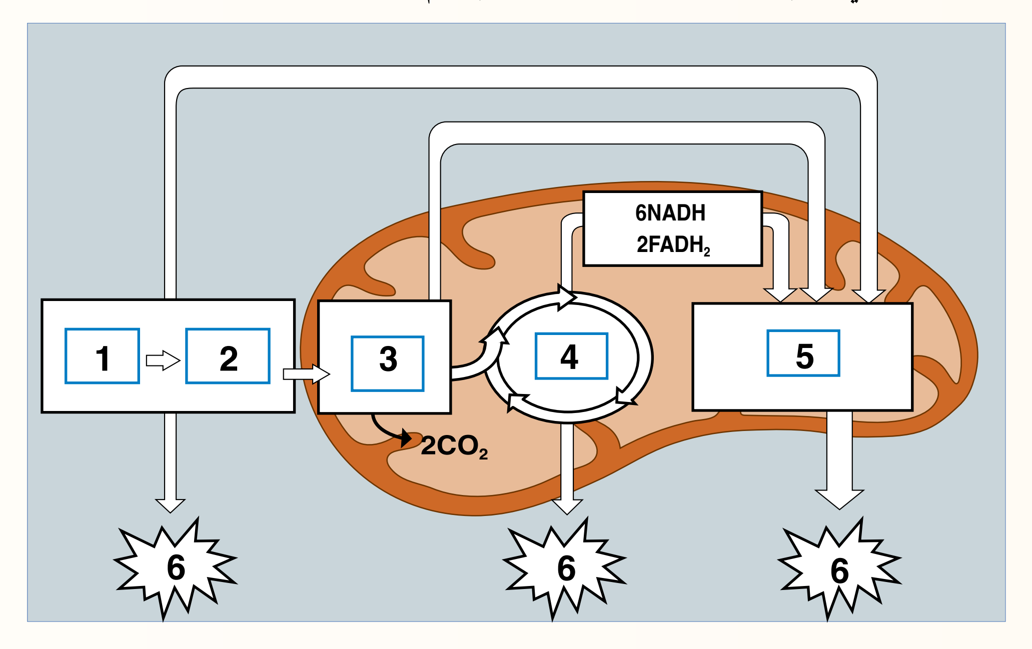
البناء الضوئي الصناعي Artificial Photosynthesis

للحَدِّ من المشكلات البيئية الناجمة عن استخدام الوقود الأحفوري، مثل: التغيُّر المناخي، وظاهرة الاحتباس الحراري Global Warming التي سببها انبعاث غاز ثاني أكسيد الكربون، وتوفير ما يَلزم من موارد البيئة عالميًّا؛ تتوالى جهود العلماء لإيجاد تقنيات رخيصة ونظيفة تحاكي عملية البناء الضوئي صناعيًّا، مثل: تصنيع ورقة نبات صناعية يُمكِنها امتصاص الطاقة الشمسية، وتحليل الماء لإنتاج الهيدروجين واستخدامه وَقودًا، أو استخدامه في إنتاج أنواع وَقود أُخرى مُتجدِّدة وآمنة ومستدامة، وإنتاج الغذاء والأسمدة والأدوية بكفاءة أكبر من كفاءة طاقة الكتلة الحيوية لأوراق النباتات.

مراجعة الدرس

1. **الفكرة الرئيسة:** ما المقصود بعمليات الأيض؟

2. أدرس الشكل الآتي الذي يُبيِّن مراحل التنفُّس الخلوي، ثم أُجيب عن السؤالين التاليين:



أ. أكتب ما يشير إليه كل رقم من الأرقام (1-6) في الشكل، مُستخدِمًا المفاهيم الآتية:

جزيئا بيروفيت، فسفرة تأكسدية، غلوكوز، ATP، دورتان من حلقة كربس، جزيئا أستيل مُرافِق إنزيم – أ.

ب. ما عدد جزيئات ATP الكلية الناتجة من أكسدة جزيء واحد من الغلوكوز؟

3. في أيِّ مراحل عملية البناء الضوئي يحدث كلٌّ ممّا يأتي:

أ. تثبيت CO_2.

ب. تحلُّل H_2O.

جـ. اختزال حمض الغليسرين أُحادي الفوسفات (PGA) إلى غليسر ألدهيد أُحادي الفوسفات (PGAL).

د. إنتاج ATP.

4. أ. ما مُستقبِل الإلكترونات النهائي في كلٍّ ممّا يأتي:

1. سلسلة نقل الإلكترون في عملية التنفُّس الهوائي.
2. عملية التنفُّس اللاهوائي لبكتيريا اختزال الكبريتات.

ب. أذكر اسم المُركَّب الناتج من كلٍّ منهما.

5. أُوضِّح أهمية كلٍّ ممّا يأتي:

أ. عملية التخمُّر في إنتاج الطاقة.

ب. الماء في التفاعلات الضوئية اللاحلقية في البناء الضوئي.

6. أدرس الشكل المجاور الذي يُمثِّل عملية إنتاج ATP في كلٍّ من الميتوكندريا، والبلاستيدات الخضراء، ثم أُجيب عن الأسئلة الآتية:

أ. أذكر أسماء الأجزاء المشار إليها بالرموز: س، ص، ع، التي توجد في كلٍّ من الميتوكندريا، والبلاستيدات الخضراء.

ب. أُوضِّح آليَّة عمل الأسموزية الكيميائية في إنتاج جزيئات ATP في كلٍّ من الميتوكندريا، والبلاستيدات الخضراء.

جـ. ما أهمية الانثناءات (الأعراف) لتفاعلات سلسلة نقل الإلكترون في الميتوكندريا؟

الإثراء والتوسُّع

البكتيريا والطاقة Bacteria and Energy

تعمل بعض الكائنات الحيَّة الدقيقة اللاهوائية على إنتاج مواد عضوية في عمليةٍ تُسمّى **البناء الكيميائي** **Chemosynthesis**؛ إذ تَستخدم هذه الأنواع بعض المواد التي تتأكسد بسهولة، بوصفها مصدرًا للإلكترونات مثل H_2S، بدلًا من الماء. ومن الأمثلة عليها: بعض أنواع الأثريات، وبكتيريا المياه الحارَّة التي تعيش في بيئات لا يصلها الضوء، وبكتيريا الكبريت.

يُمكِن لبعض أنواع البكتيريا اللاهوائية التي تعيش في المناجم وفي قاع البحيرات أنْ تحصل على الطاقة عن طريق استخدام الإلكترونات الناتجة من أكسدة المواد الموجودة في البيئة المحيطة. وقد اكتشف باحثون من جامعة ماساتشوستس الأمريكية أنَّ بكتيريا جيوباكتر ***Geobacter*** تتخلَّص من الإلكترونات التي توجد داخلها باستعمال شعيرات طويلة؛ وهي تراكيب تنتشر على سطوح الخلايا البكتيرية، وتتكوَّن من ألياف نانوية موصِلة للكهرباء، ويُعتقَد أنَّها تتكوَّن من بروتينات تُشبِه السيتوكرومات Cytochromes.

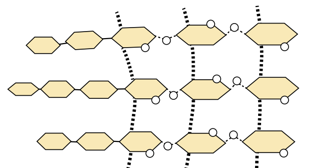
يسعى العلماء إلى الاستفادة من خصائص البكتيريا الموصِلة للكهرباء في إنتاج تكنولوجيا حيَّة وصديقة للبيئة، تُستخدَم في المجالات الطبية، وتوليد الكهرباء، وتعقيم المياه الجوفية.

أُصمِّم مَطوِيَّة أُلخِّص فيها عملية البناء الكيميائي.

السؤال الأوَّل:

لكل فقرة من الفقرات الآتية أربع إجابات، واحدة فقط صحيحة، أُحدِّدها:

1. أحد أنواع الكربوهيدرات الذي يُمثِّله الشكل المجاور هو:



أ. السيليلوز.

ب. النشا.

جـ. الغلايكوجين.

د. السُّكَّر الثنائي.

2. الكائنات الحيَّة التي تستخدم الغلايكوجين في تخزين الطاقة هي:

أ. الحيوانات. ب. النباتات.

جـ. الفطريات. د. البكتيريا.

3. يُعَدُّ الغلوكوز والغلاكتوز من السُّكَّريات:

أ. الأُحادية. ب. الثنائية.

جـ. الثلاثية. د. المُتعدِّدة.

4. يشير الرقم (1) في الشكل المجاور إلى:

أ. مجموعة كربوكسيل.

ب. مجموعة أمين.

جـ. جزيء غليسرول.

د. مجموعة هيدروكسيل.

(1)

5. إحدى الخصائص الآتية تنطبق غالبًا على البروتينات الليفية:

أ. الذوبان في الماء.

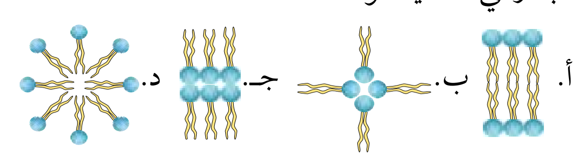
ب. وجود سلاسلها الجانبية R القطبية في اتجاه الخارج، مُواجِهةً للمحاليل المائية.

جـ. من الأمثلة عليها الهيموغلوبين.

د. وجود سلاسلها الجانبية R غير القطبية في اتجاه الخارج، مُواجِهةً للمحاليل المائية.

6. الترتيب الصحيح لليبيدات المُفسفَرة في الغشاء البلازمي للخلية هو:

أ. ب. جـ. د.



7. المُركَّب العضوي الحيوي الذي تُمثِّله الصيغة البنائية في الشكل المجاور هو:

مجموعة كيميائية

A B C D

أ. السيليلوز.

ب. النشا.

جـ. البروتين.

د. الستيرويد.

8. فصيلة دم المريض الذي يستقبل خلايا دم حمراء من فصائل الدم جميعها، لكنَّه لا يستطيع التبرُّع بخلايا دم حمراء إلّا لمرضى من فصيلة دمه فقط، هي:

أ. O^+ ب. AB^- جـ. O^- د. AB^+

9. إحدى العبارات الآتية صحيحة في ما يتعلَّق بالحموض النووية في الخلايا حقيقية النوى:

أ. احتواء RNA على القاعدة النيتروجينية يوراسيل.

ب. احتواء DNA على القاعدة النيتروجينية يوراسيل.

جـ. احتواء RNA على القاعدة النيتروجينية ثايمين.

د. تكوُّن DNA من سلسلة واحدة، وتكوُّن RNA من سلسلتين لولبيتين.

10. إحدى الآتية لا تُعَدُّ جزءًا من النيوكليوتيدات:

أ. الفوسفات. ب. الغليسرول.

جـ. القاعدة النيتروجينية. د. السُّكَّر الخماسي.

11. الدور الرئيس للتفاعلات في حلقة كربس هو:

أ. إنتاج الطاقة.

ب. إنتاج CO_2.

جـ. اختزال NAD^+، و FAD؛ لاستخدامهما في الفسفرة التأكسدية.

د. إنتاج أستيل مُرافِق إنزيم _ أ.

12. الطول الموجي للضوء الذي تمتصه صبغة النظام الأوَّل بأقصى فاعلية بوحدة النانومتر (nm) هو:

أ. 860 ب. 700 جـ. 680 د. 760

13. نواتج التفاعلات الضوئية التي تُستخدَم في حلقة كالفن هي:

أ. CO_2 ،ATP ب. O_2،NADPH جـ. ATP ،NADPH د. ATP ،H_2O

14. عدد جزيئات الغلوكوز المتأكسدة في حال أُنتِج (12) جزيئًا من CO_2 في عملية التنفُّس الهوائي هو:

أ. جزيء واحد. ب. جزيئان. جـ. ثلاثة جزيئات. د. أربعة جزيئات.

15. عملية فقدان جزيء NADH للإلكترونات تُسمّى:

أ. أكسدةً. ب. اختزالًا. جـ. فسفرةً. د. بناءً كيميائيًّا.

16. تُنتَج جزيئات ATP من المراحل الآتية جميعها باستثناء:

أ. حلقة كالفن. ب. حلقة كربس. جـ. الفسفرة التأكسدية. د. التحلُّل الغلايكولي.

17. مصدر الأكسجين المُنطلِق من عملية البناء الضوئي هو:

أ. الهواء. ب. ثاني أكسيد الكربون. جـ. الغلوكوز. د. الماء.

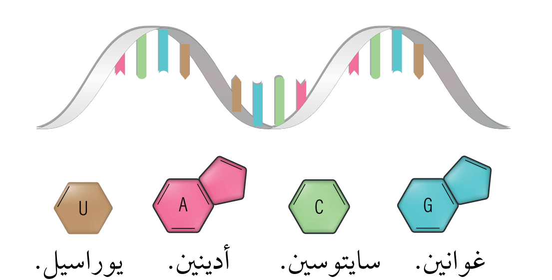
السؤال الثاني:

أَصِل بين المصطلح العلمي ورمز الوصف المُناسِب له في ما يأتي:

المصطلح	الرمز	الوصف
الرابطة الغلايكوسيدية	أ	الطاقة اللازمة لبَدْء التفاعل الكيميائي.
التحلُّل الغلايكولي	ب	بروتين يتصل بسلسلة أو أكثر من السُّكَّريات.
ATP	ج	رابطة تساهمية تربط بين الغليسرول والحموض الدهنية.
مُرافِقات الإنزيم	د	تحطُّم الغلوكوز لإنتاج جزيئي بيروفيت.
البيريميدينات	هـ	جزيء حفظ الطاقة الذي يتكوَّن من الأدينين، وسُكَّر الرايبوز، وثلاث مجموعات من الفوسفات.
الرابطة الإسترية	و	الهيكل الأساسي لمستويات البروتين.
البروتين السُّكَّري	ز	يُكسب جدران الخلايا النباتية المرونة والقوَّة.
طاقة التنشيط	ح	تحدث تفاعلاتها في اللُّحْمة داخل البلاستيدة.
حلقة كالفن	ط	قواعد نيتروجينية تتكوَّن من حلقة واحدة، ويُمثِّلها اليوراسيل، والثايمين، والسايتوسين.
البناء الصناعي	ي	رابطة تساهمية تربط بين جزيئات الغلوكوز.
التركيب الأوَّلي للبروتين	ك	تحدث تفاعلاتها في الحشوة داخل الميتوكندريا.
حلقة كربس	ل	استخدام ورقة نبات صناعية قادرة على امتصاص الطاقة الشمسية، وتحليل الماء.
السيليلوز	م	عوامل مساعدة عضوية للإنزيمات.

السؤال الثالث:

بناءً على دراستي موضوع الحموض النووية، أُجيب عن السؤالين الآتيين:



أ. أُصنِّف الحمض النووي في الشكل المجاور إلى DNA أو RNA، مُفسِّرًا إجابتي.

ب. ما نسبة السايتوسين في قطعة من DNA إذا كانت نسبة الغوانين فيها (42%)؟

السؤال الرابع:

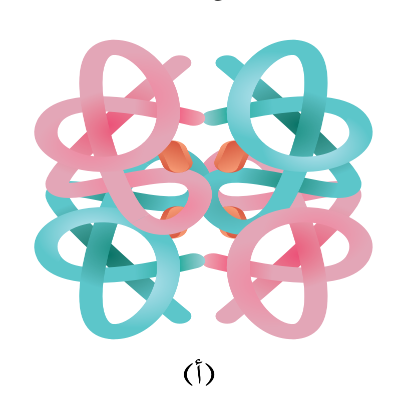
متبرع فصيلة دمه AB:

أ . ما مُولِّدات الضد على سطوح خلايا دمه الحمراء بحسب نظام ABO؟

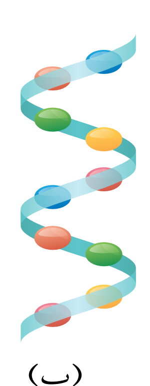
ب. **أُفسِّر**: لماذا لا يمكن لهذا المتبرع التبرع بوحدة دم إلى مريض فصيلة دمه O؟

السؤال الخامس:

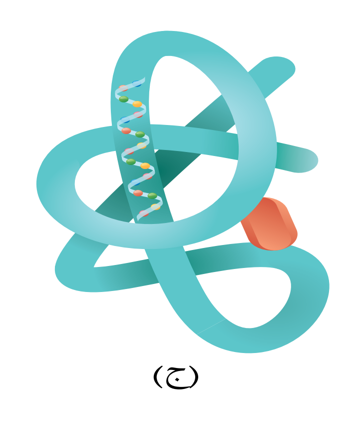
أُحدِّد مستوى تركيب كلٍّ من البروتينات الآتية:



(أ)



(ب)



(ج)

السؤال السادس:

يُمثِّل الشكل المجاور العلاقة بين درجة الحرارة وسرعة التفاعل المُحفَّز بإنزيمات مُعيَّنة لكائنين حيَّين مختلفين (ل، م):

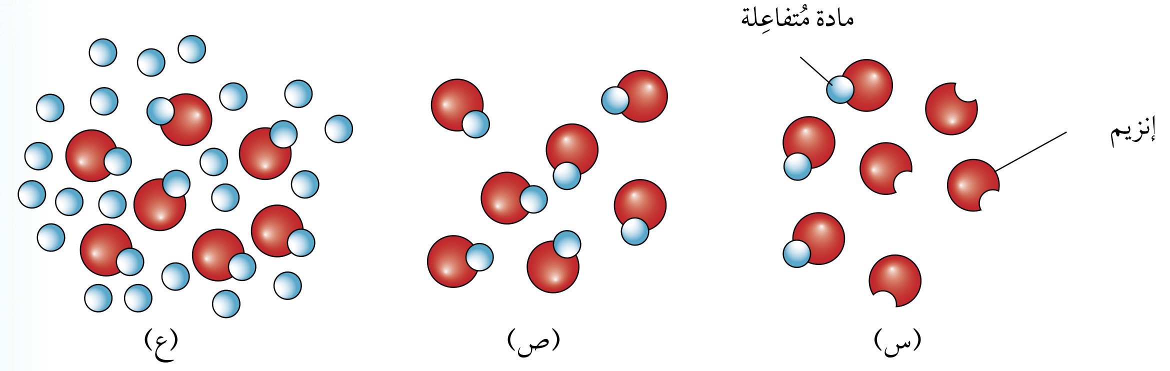
سرعة التفاعل
س
م
ل
30 40 50 70 80 90 100
درجة الحرارة (°C)

أ. ماذا تُسمّى درجة الحرارة التي تصل فيها سرعة التفاعل إلى النقطة (س)؟

ب. أيُّ الكائنين يُمثِّل بكتيريا تعيش في المياه الحارَّة، مُفسِّرًا إجابتي؟

السؤال السابع:

أدرس الشكل الآتي الذي يُبيِّن أثر زيادة تركيز المادة المُتفاعِلة في سرعة التفاعل، ثم أُجيب عن السؤالين التاليين:



أ. أيُّ الحالات (س، ص، ع) يُمكِن فيها زيادة سرعة التفاعل عند زيادة تركيز المادة المُتفاعِلة؟

ب. أُحدِّد الحالات التي لا يُمكِن فيها زيادة سرعة التفاعل مهما زاد تركيز المادة المُتفاعِلة، مُفسِّرًا إجابتي.

السؤال الثامن:

أُحدِّد عدد الجزيئات الناتجة من أكسدة جزيء واحد من الغلوكوز في كل مرحلة من المراحل الوارد ذكرها في الجدول الآتي:

المرحلة	عدد جزيئات NADH	عدد جزيئات $FADH_2$	عدد جزيئات ATP الناتجة مباشرةً	عدد جزيئات CO_2 الناتجة	عدد جزيئات ATP الناتجة من الفسفرة التأكسدية	عدد جزيئات ATP الكلية
التحلُّل الغلايكولي						
أكسدة البيروفيت (جزيئان)						
حلقة كربس (دورتان)						
مجموع جزيئات ATP						

السؤال التاسع:

في أشهر زمنية مُحدَّدة من عام 1930م، وصف أطبّاء التغذية للأشخاص ذوي الوزن الزائد كمِّياتٍ قليلةً من مُركَّب يُسمّى داينيتروفينول Dinitrophenol (DNP) بوصفه عَقّارًا يساعدهم على فقدان الوزن الزائد، ولكنْ سرعان ما حُظِر هذا المُركَّب بعد تسبُّبه في آثار جانبية ضارَّة عند متعاطيه.

يجعل هذا المُركَّب غشاء الميتوكندريا الداخلي مُسرِّبًا للبروتونات H^+، فتنتقل من منطقة الحيِّز بين غشائي إلى داخل الحشوة.

أتوقَّع تأثير تناول هذا العقار في عملية الأسموزية الكيميائية، مُبرِّرًا إجابتي.

السؤال العاشر:

ينتج من تفاعلات حلقة كالفن مُركَّباتٌ عضويةٌ تَختزن الطاقة:

أ. **أُفسِّر**: لماذا تعتمد حلقة كالفن على التفاعلات الضوئية؟

ب. **أُوضِّح** العمليات التي تحدث في مرحلة تثبيت الكربون داخل حلقة كالفن.

السؤال الحادي عشر:

أُحدِّد أوجه التشابه والاختلاف بين كلٍّ ممّا يأتي:

أ. التنفُّس الخلوي في خلية عضلية للاعب في بداية سباق طويل المسافة (ماراثون)، والتنفُّس الخلوي في الخلية العضلية نفسها لهذا اللاعب في نهاية السباق.

ب. التفاعلات الضوئية الحلقية، والتفاعلات الضوئية اللاحلقية.

السؤال الثاني عشر:

أدرس المُخطَّط المجاور الذي يُبيِّن خطوات عملية التخمُّر الكحولي، ثم أُجيب عن الأسئلة الآتية:

غلوكوز

الخطوة رقم (1).

بيروفيت

ص

الخطوة رقم (2).

المُركَّب (س)

الخطوة رقم (3).

كحول إيثيلي

أ . ما اسم المرحلة المشار إليها بالرمز (ص)؟ أين تحدث؟

ب. ما اسم المُركَّب المشار إليه بالرمز (س)؟

جـ. ما رقم الخطوة التي يُنتَج فيها غاز ثاني أكسيد الكربون؟

د. كم جزيئًا من الكحول الإيثيلي ينتج من تحطُّم جزيء واحد من الغلوكوز؟

هـ. أُوضِّح كيف يستفاد من عملية التخمُّر الكحولي في صناعة المُعجِّنات.

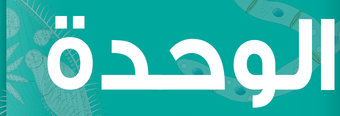
السؤال الثالث عشر:

أُقارِن بين الميتوكندريا والبلاستيدات الخضراء، مستعينًا بالجدول الآتي.

العُضيّات / وجه المقارنة	الميتوكندريا	البلاستيدات الخضراء
عملية الأيض التي تحدث فيها.		
مصدر الطاقة.		
مصدر الإلكترونات في سلسلة نقل الإلكترون.		
وصف حركة البروتونات H^+ في أثناء الأسموزية الكيميائية.		

السؤال الرابع عشر:

أُنشِئ جدولًا للمقارنة بين بروتين الهيموغلوبين وبروتين الفايبرين من حيث: الذائبية في الماء، والشكل النهائي الثلاثي الأبعاد، والوظيفة الحيوية.



الوحدة 2

دورة الخلية وتصنيع البروتينات
Cell Cycle and Proteins Synthesis

قال تعالى:

﴿إِنَّا خَلَقْنَا ٱلْإِنسَٰنَ مِن نُّطْفَةٍ أَمْشَاجٍ نَّبْتَلِيهِ فَجَعَلْنَٰهُ سَمِيعًۢا بَصِيرًا﴾

(سورة الإنسان، الآية 2).

أتأمَّل الصورة

يؤدّي الانقسام الخلوي دورًا في نمو الكائنات الحيَّة وتكاثرها، وتُمثِّل الصورة في الأعلى نمذجة لخلايا ناتجة من انقسام خلوي. فما المراحل التي تمرُّ بها الخلية قبل انقسامها؟ ما الذي يضبط هذه المراحل؟ كيف تُصنِّع الخلايا البروتينات التي تحتاج إليها؟

الفكرة العامة:

تمرُّ الخلية في أثناء حياتها بدورة تشمل مراحل عِدَّة، وتعمل على تصنيع البروتينات اللازمة لأداء أنشطتها الحيوية، وتنظيم هذه الدورة.

الدرس الأوَّل: دورة الخلية.

الفكرة الرئيسة: تتألَّف دورة الخلية من مراحل وأطوار تُسهِم في تنظيمها إشارات خلوية عديدة. وتكون جميع الخلايا الحيَّة دائمًا في مرحلة ما من دورة الخلية.

الدرس الثاني: الانقسام الخلوي وأهميته.

الفكرة الرئيسة: للانقسام الخلوي أنواع عِدَّة، لكلٍّ منها أهميته في استمرار الحياة، وبقاء الأنواع الحيَّة المختلفة على سطح الأرض.

الدرس الثالث: تضاعف DNA والتعبير الجيني.

الفكرة الرئيسة: يمتاز جزيء DNA بقدرته على التضاعف، وتُعَدُّ المعلومات التي يحملها هي الأساس في عمليات تصنيع الخلية للبروتينات. تحدث عملية التعبير الجيني في الخلية، وهي تختلف بين الخلايا تبعًا لاختلاف الأنشطة والوظائف التي تقوم بها كلٌّ منها.

تجربة استهلالية

الانقسام المتساوي في خلايا القمم النامية لجذور الثوم

تُسهِم دراسة الانقسام الخلوي إسهامًا كبيرًا في فهم كثير من العمليات الحيوية. وتُعَدُّ دراسة انقسام خلايا القمم النامية لجذور النباتات إحدى أسهل الطرائق لدراسة الانقسام الخلوي.

المواد والأدوات: كأس زجاجية صغيرة فيها ماء، نكّاشة أسنان، شرائح زجاجية وأغطيتها، صبغة خـــلايا نباتية مثل السفرانين، مجهر ضوئي، مـــشرط، فصوص ثوم، ملقط، حمض الهيدروكلوريك (1M)، محلول من حمض الخليك والإيثانول (نسبة حمض الخليك إلى الإيثانول 3:1)، قفّازات، ورق تنشيف، قلم رصاص، ماء، طبق بتري زجاجي.

إرشادات السلامة:

- استعمال المشرط والمواد الكيميائية بحذر.
- غسل اليدين جيدًا بعد انتهاء التجربة.

خطوات العمل:

1. **أُجرِّب:** أُثبِّت فَصَّ الثوم على فُوَّهة الكأس باستخدام نكّاشة الأسنان، مُراعِيًا غَمْر الجذور فقط في الماء كما في الشكل المجاور؛ تجنُّبًا لتعفُّن فَصِّ الثوم.
2. **أُلاحِظ** نمو الجذور بعد (3-4) أيام.
3. **أُجرِّب:** أقطع cm (1-3) من نهايات القمم النامية للجذور، ثم أضعها في كأس تحوي محلول حمض الخليك والإيثانول مدَّة min (10). بعد ذلك أُسخِّن محلول حمـــض الهيـــدروكلوريك في حمّام مائي حتى تصبح درجة حرارته $60\ ^0C$.
4. **أُجرِّب:** أغسل الجذور بالماء البارد مدَّةً تتراوح بين min (4-5)، ثم أُنشِّفها جيدًا بورق التنشيف. بعد ذلك أنقلها إلى الكأس التي تحوي محلول حمض الهيدروكلوريك الساخن، وأتركها فيه مدَّة min (5).
5. **أُجرِّب:** أنقل الجذور إلى طبق بتري باستخدام الملقط، وأغسلها بالماء البارد، ثم أُنشِّفها جيدًا بورق التنشيف، ثم أضعها على شريحة زجاجية نظيفة. بعد ذلك أَقُصُّ mm (2) من قمم الجذور النامية، ثم أُبقيها على الشريحة، وأتخلَّص من بقية الجذور.
6. أُضيف قطرة من الصبغة إلى القمم النامية على الشريحة، ثم أضع غطاء الشريحة، ثم أسحق العيِّنة بالضغط عليها بلطف فوق غطاء الشريحة باستخدام الطرف العريض لقلم الرصاص.
7. **أُلاحِظ** الخلايا باستخدام المجهر الضوئي بعد تكبيرها X 400، ثم أُدوِّن ملاحظاتي.

التحليل والاستنتاج:

1. **أحسُبُ** النسبة المئوية لكل طور من أطوار الانقسام الخلوي.
2. أُمثِّل بيانيًّا أعداد الخلايا في كل طور.
3. **أتواصل:** أُناقِش زملائي/ زميلاتي في النتائج التي توصَّلْتُ إليها، ثم أُقارِنها بنتائجهم.



دورة الخلية
Cell Cycle

الدرس 1

الفكرة الرئيسة:

تتألَّف دورة الخلية من مراحل وأطوار تُسهِم في تنظيمها إشارات خلوية عديدة. وتكون جميع الخلايا الحيَّة دائمًا في مرحلة ما من دورة الخلية.

نتاجات التعلُّم:

- أَصِف مراحل دورة الخلية.
- أُوضِّح آلية تنظيم مراحل دورة الخلية وأطوارها.

المفاهيم والمصطلحات:

دورة الخلية	Cell Cycle
الطور الصفري	G_0 Phase
الإشارات الخلوية	Cellular Signals
إشارات التقدُّم	Go-ahead Signals
إشارات التوقُّف	Stop Signals
نقطة المراقبة	Checkpoint
السايكلينات	Cyclins
إنزيمات الفسفرة المُعتمِدة على السايكلين	Cyclin-Dependent Kinases (Cdks)

ما دورة الخلية؟ What is Cell Cycle?

لكل كائن حيٍّ على سطح الأرض دورة حياة، وكذلك الخلايا المُكوِّنة لهذه الكائنات؛ إذ إنَّ لكل خلية دورة حياة تمرُّ بها، وتبدأ منذ تكوُّن الخلية نتيجة انقسام خلية ما، وتنتهي عند انقسامها هي نفسها مُكوِّنةً خليتين جديدتين، وتُسمّى هذه الدورة **دورة الخلية Cell Cycle**.

تختلف الخلايا في ما بينها من حيث مدَّة الدورة لكلٍّ منها، ويعتمد ذلك على عوامل مختلفة، منها: نوع الخلية، والظروف التي تحيط بها. فمثلًا، تنقسم خلية قِمَّة نامية في جذر بصل كل 20 ساعة تقريبًا، أنظر الشكل (1)، في حين تنقسم خلية طلائية في الأمعاء الدقيقة لإنسان كل (10-12) ساعة.

تمرُّ دورة الخلية بمرحلتين رئيستين، هما: المرحلة البينية، ومرحلة الانقسام الخلوي، وتحوي كل مرحلة منهما أطوارًا عِدَّةً.

أتحقَّق: أُعرِّف دورة الخلية.

الشكل (1): بعض مراحل دورة الخلية في خلايا قِمَّة نامية لجذر بصل.

مراحل دورة الخلية Cell Cycle Phases

تمرُّ دورة الخلية في الكائنات حقيقية النوى بمرحلتين رئيستين، هما: المرحلة البينية التي تتكوَّن من طور النمو الأوَّل (G_1)، وطور التضاعف (S)، وطور النمو الثاني (G_2)، ومرحلة الانقسام الخلوي (M) التي تتكوَّن من أطوار عِدَّة، لكلٍّ منها سماته التي تُميِّزه عن غيره من الأطوار.

✔ **أتحقَّق:** ما المراحل الرئيسة التي تمرُّ بها خلية جلد إنسان في دورة الخلية؟

المرحلة البينية Interphase

تتكوَّن المرحلة البينية من أطوار عِدَّة، أنظر الشكل (2)، وتُمثِّل غالبًا ما نسبته 90% من دورة الخلية؛ إذ تنمو في أثنائها الخلية، ويتضاعف عدد الكروموسومات تمهيدًا للانقسام الخلوي.

G_1

طور النمو الأوَّل G_1 Phase: يُعَدُّ هذا الطور أوَّل أطوار دورة الخلية، وفيه تنمو الخلية، ويزداد كلٌّ من حجمها، وعدد العُضَيّات فيها، فضلًا عن أداء الخلية أنشطتها ووظائفها الخلوية الطبيعية.

G_2

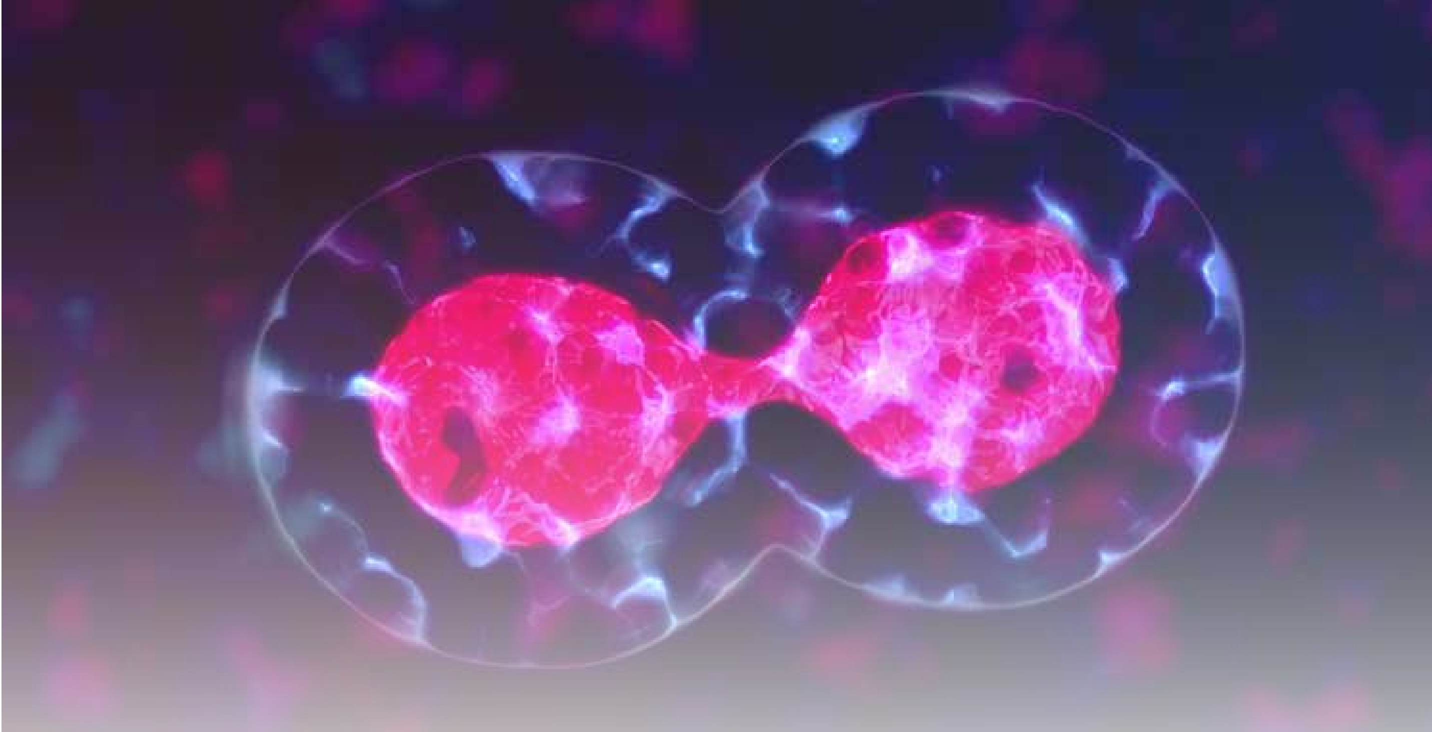
طور النمو الثاني G_2 Phase: يستمر نمو الخلية في هذا الطور، فيزداد حجمها، فضلًا عن أدائها أنشطتها ووظائفها الخلوية الطبيعية، إلى جانب استعدادها للانقسام؛ إذ تبدأ بإنتاج البروتينات التي تُصنَّع منها الخيوط المغزلية (الأُنَيْبيبات الدقيقة).

S

طور التضاعف S Phase (Synthesis): في هذا الطور يتضاعف (DNA)؛ ما يجعل في نواة الخلية - في نهاية الطور - مثلي كمِّية المادة الوراثية.

الشكل (2): أطوار المرحلة البينية.

أتتبَّع أطوار المرحلة البينية، مُوضِّحًا ما يحدث في كلٍّ منها.



▲ الشكل (3): انقسام السيتوبلازم بعد انقسام النواة.

مرحلة الانقسام الخلوي (M) Phase

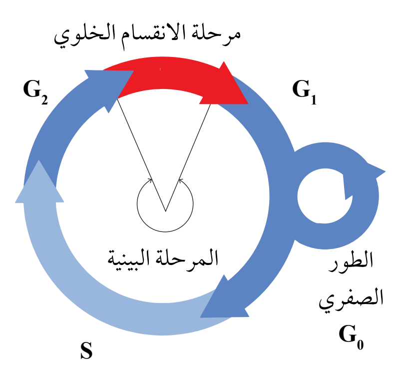
تبدأ هذه المرحلة بعد طور النمو الثاني؛ ويحدث فيها انقسام النواة Karyokinesis؛ أيِ انقسام نواة الخلية إلى نواتين مُتماثِلتين، وهو ما يحدث على نحوٍ مُشابِهٍ في جميع الخلايا حقيقية النوى. يلي ذلك انقسام السيتوبلازم Cytokinesis، أنظر الشكل (3)، ويختلف هذا الانقسام في الخلايا النباتية عنه في الخلايا الحيوانية.

✓ **أتحقَّق:** متى تبدأ مرحلة الانقسام الخلوي؟

الطور الصفري G_0

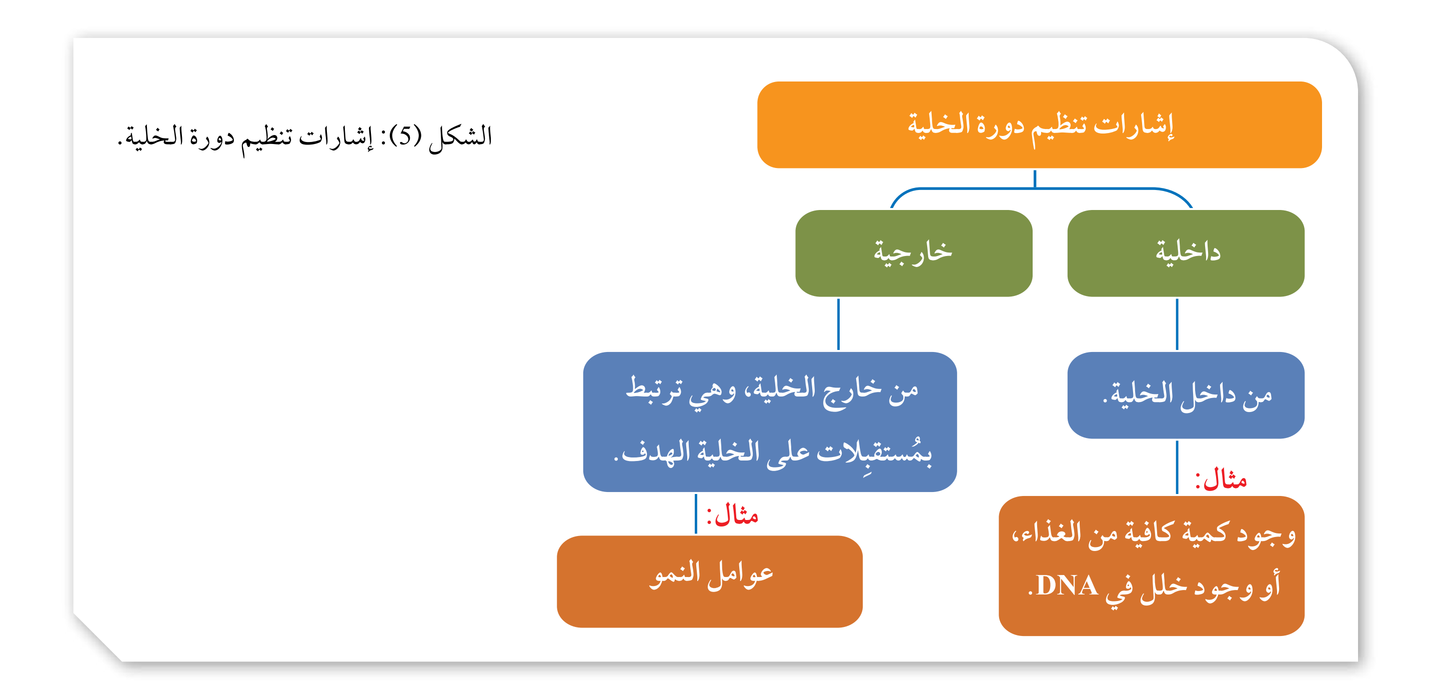
تختلف الخلايا بعضها عن بعض من حيث النشاط في الانقسام؛ فمنها ما يكون نشيطًا، ويُكمِل دورة الخلية كاملة، مثل الخلايا الطلائية المُبطِّنة للقناة الهضمية، ومنها ما يدخل في طور سكون يُسمّى **الطور الصفري** G_0. تخرج الخلية من طور G_1 إلى هذا الطور في حال غياب الإشارات الخلوية (سأدرسها لاحقًا) التي تُحفِّز الخلية على الاستمرار في الدورة. ومن الأمثلة على الخلايا التي تدخل طور G_0: الخلايا العضلية، والخلايا العصبية، أنظر الشكل (4).

تقوم الخلية في الطور الصفري بجميع وظائفها وأنشطتها باستثناء الأنشطة التي تُهيِّئها للانقسام، علمًا بأنَّ بعض الخلايا لا تغادر هذا الطور بعد دخولها فيه، خلافًا لخلايا أُخرى تتمكَّن من العودة إلى طور G_1، وإكمال دورة الخلية عند تحفيزها بالإشارات الخلوية المُناسِبة، ومن الأمثلة على هذه الخلايا خلايا الكبد.



الشكل (4): خروج الخلية من دورة الخلية، ودخولها الطور الصفري.

✓ **أتحقَّق:** أذكر أمثلة على بعض الخلايا التي تدخل الطور الصفري.



الشكل (5): إشارات تنظيم دورة الخلية.

تنظيم دورة الخلية Regulation of Cell Cycle

تعمل مجموعة من المواد الكيميائية على تنظيم دورة الخلية، ويُطلَق على هذه المواد التي معظمها بروتينات اسم **الإشارات الخلوية Cellular Signals**، وهي تُصنَّف بحسب مصدرها إلى إشارات داخلية، وإشارات خارجية، أنظر الشكل (5). يعمل العلماء على تحديد المسارات التي تربط الإشارات الخلوية الخارجية بالداخلية منها، علمًا بأنَّ آليَّة تنظيم دورة الخلية والإشارات الخلوية التي تُسهِم في ذلك مُتشابِهة في معظم الخلايا حقيقية النوى. فمثلًا، بعض البروتينات التي تتحكَّم في دورة خلية لنوع من الكائنات الحيَّة حقيقية النوى يُمكِنها أيضًا التحكُّم في تنظيم دورة الخلية لنوع آخر من هذه الكائنات.

تُصنَّف هذه الإشارات بحسب آليَّة عملها إلى ثلاثة أنواع، هي: **إشارات التقدُّم Go-ahead Signals** التي تُحفِّز انتقال الخلية إلى المرحلة اللاحقة أو الطور اللاحق، و**إشارات التوقُّف Stop Signals** التي تعمل على بقاء الخلية في الطور، وعدم انتقالها إلى الطور الذي يليه، وإشارات تُسبِّب الموت المُبرمَج للخلية Apoptosis Signals بتنشيطها جينات تُسهِم في إنتاج إنزيمات تُحطِّم مُكوِّنات في الخلية؛ ما يؤدّي إلى موتها.

أفكِّر: لماذا لا تستجيب بعض الخلايا للإشارات الخارجية؟

أتحقَّق: ما أهمية الإشارات الخلوية في دورة الخلية؟

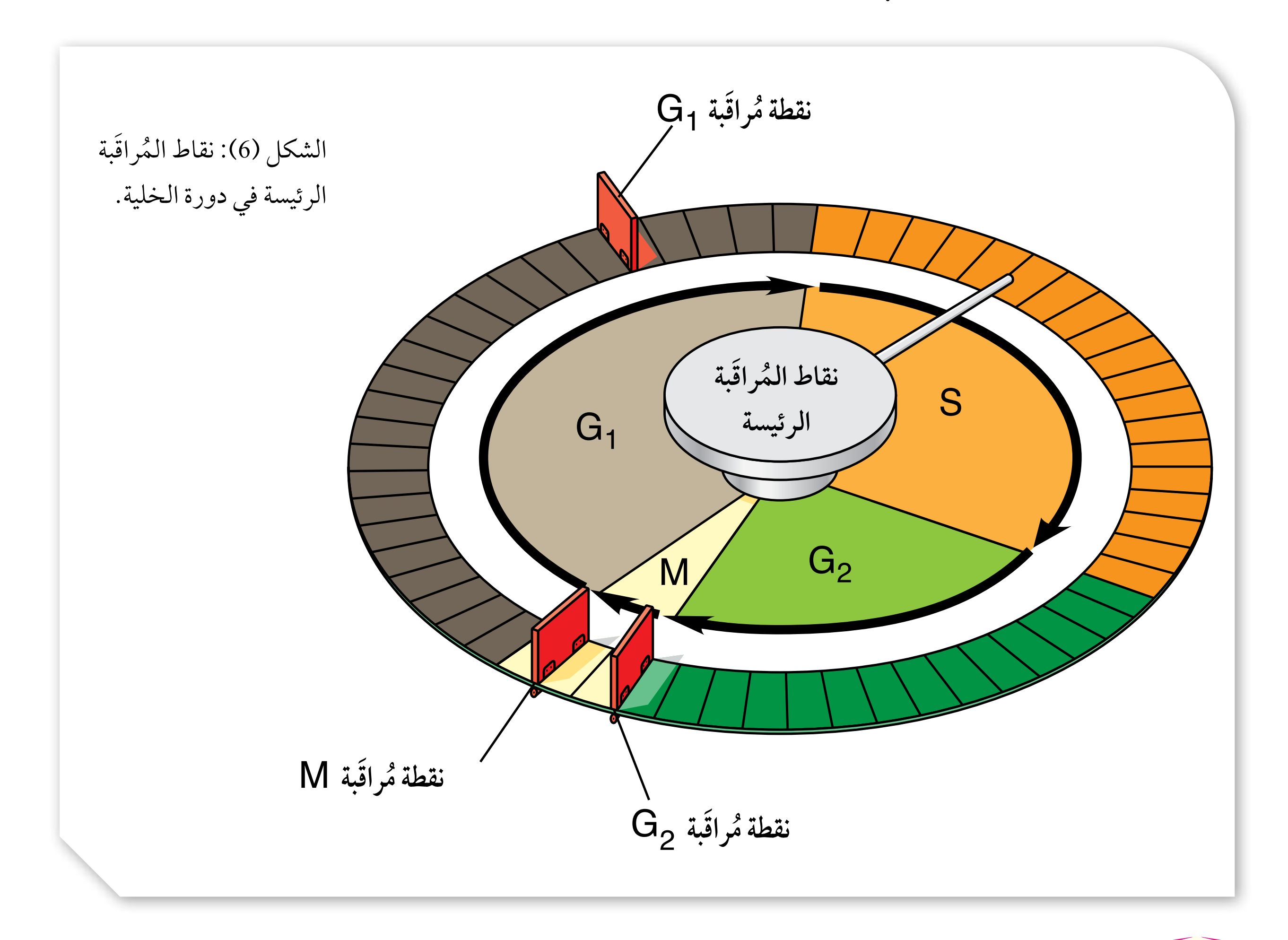
نقاط المُراقَبة Checkpoints

تُنظِّم الإشارات الخلوية دورة الخلية في نقاط مُحدَّدة، تُسمّى كلٌّ منها **نقطة مُراقَبة Checkpoint** .

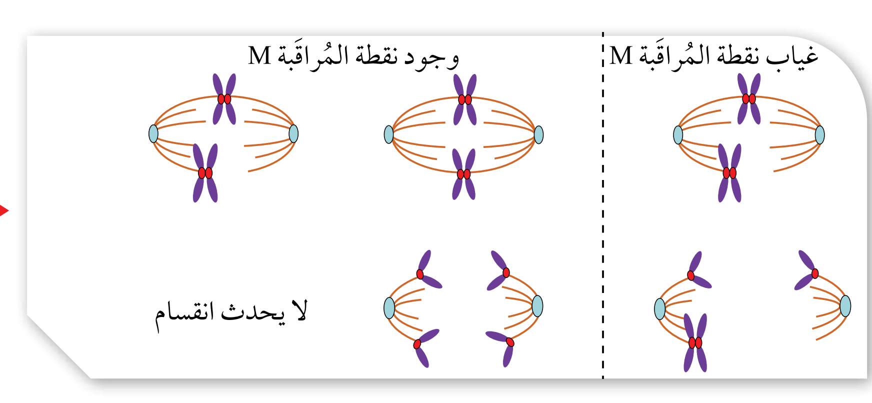
توجد نقاط مُراقَبة عديدة، ولكنَّ نقاط المُراقَبة: G_1، وG_2، و M، هي الرئيسة منها، أنظر الشكل (6).

تُعَدُّ نقطة المُراقَبة G_1 أهم نقاط المُراقَبة؛ ذلك أنَّ الخلية في الطور G_1 تستقبل إشارات خلوية داخلية وخارجية تُحدِّد معًا الوقت المُناسِب لدخول الخلية طور التضاعف. وإذا لم تستقبل الخلية في نقطة المُراقَبة هذه إشارة تقدُّم، فقد لا تُكمِل الخلية بقية الأطوار، وتخرج من دورتها إلى الطور الصفري. أمّا نقطة المُراقَبة G_2 ففيها يُتحقَّق من انتهاء تضاعف DNA في طور التضاعف، ومن عدم وجود أخطاء في جزيئي DNA الناتجين من عملية تضاعف DNA. وفي حال وجود خطأ ما، فإنَّ دورة الخلية تتوقَّف عند نقطة المُراقَبة G_2؛ ما يتيح للخلية تصحيح الخطأ، أو يؤدّي إلى موتها المُبرمَج إنْ لم تستطع ذلك. يُسهِم الموت المُبرمَج في منع دخول الخلايا غير الطبيعية مرحلة الانقسام وازدياد أعدادها.

أُفكِّر: ما الأخطاء التي يُحتمَل ظهورها إذا اختفت نقطة المُراقَبة G_2؟



الشكل (6): نقاط المُراقَبة الرئيسة في دورة الخلية.



الشكل (7): الانقسام في حال ارتباط الكروماتيدات بالخيوط المغزلية، وفي حال عدم الارتباط بها.

وأمّا نقطة المُراقَبة M فتعمل ما بين الطور الاستوائي والطور الانفصالي. وفيها يُتحقَّق من ارتباط الكروماتيدات الشقيقة بالخيوط المغزلية على نحوٍ صحيح. وفي حال كانت بعض الكروماتيدات غير مُرتبِطة بالخيوط المغزلية، فإنَّ الخلية تتوقَّف عن عملية الانقسام حتى ترتبط جميع الكروماتيدات بالخيوط المغزلية، أنظر الشكل (7).

أتحقَّق: ما نقاط المُراقَبة الرئيسة في دورة الخلية؟

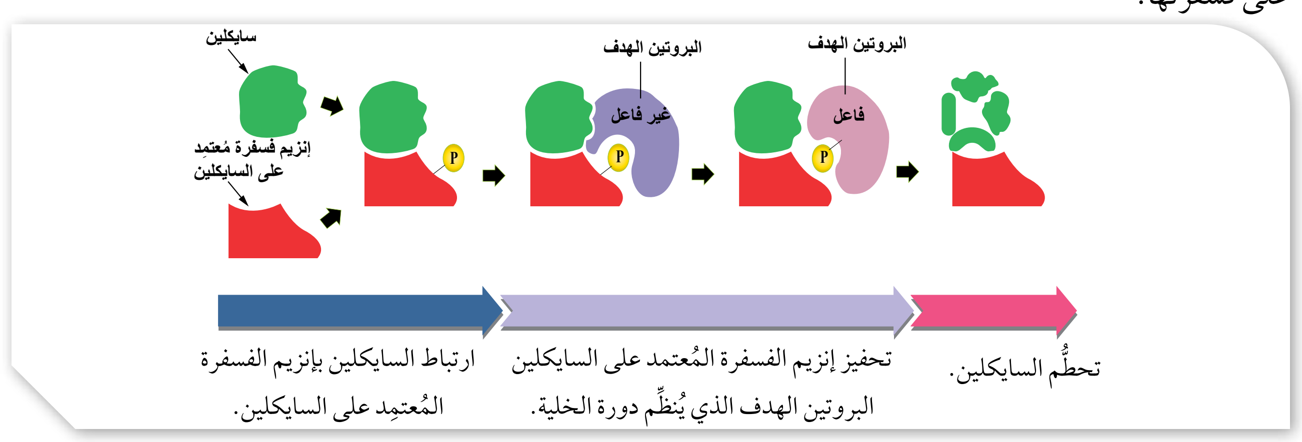
السايكلينات وإنزيمات الفسفرة المُعتمِدة على السايكلين
Cyclins and Cyclin-Dependent Kinases (Cdks)

السايكلينات Cyclins: هي مجموعة من البروتينات، توجد في معظم الخلايا حقيقية النوى، وتُصنَّع في أثناء دورة الخلية، وتُحطَّم خلالها سريعًا. وهي تُصنَّف إلى أربعة أنواع رئيسة. تؤدّي السايكلينات دورًا في تنظيم دورة الخلية؛ بتحفيزها إنزيمات تُسمّى **إنزيمات الفسفرة المُعتمِدة على السايكلينات Cyclin-Dependent Kinases (Cdks)**؛ إذ تعمل هذه الإنزيمات - بعد ارتباطها بالسايكلين- على إضافة مجموعة فوسفات إلى البروتين الهدف في عملية تُسمّى الفسفرة. وقد تؤدّي فسفرة البروتينات إلى تحفيزها أو تثبيطها بحسب حاجة الخلية، أنظر الشكل (8).

تتمثَّل أهمية ارتباط السايكلين بإنزيم الفسفرة المُعتمِد على السايكلين في أمرين رئيسين، هما: تحفيز الإنزيم، وإرشاده إلى البروتينات الهدف التي يعمل على فسفرتها.

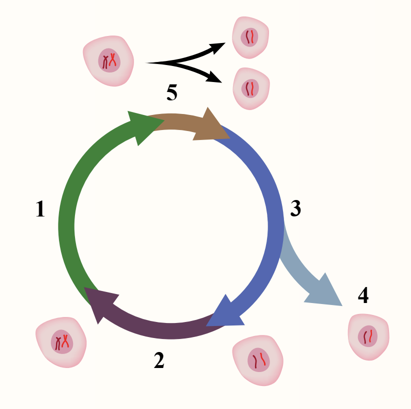
أتحقَّق: فيمَ يستفاد من ارتباط السايكلين بإنزيم الفسفرة المُعتمِد على السايكلين؟

الشكل (8): آليَّة عمل إنزيمات الفسفرة المُعتمِدة على السايكلين.



مراجعة الدرس

1. **الفكرة الرئيسة:** ما مراحل دورة الخلية؟ ما أطوار كل مرحلة منها؟
2. **أُفسِّر:** لماذا تختلف الخلايا في ما بينها من حيث المدَّة الزمنية اللازمة لإكمال دورة الخلية؟
3. أدرس الشكل المجاور الذي يُمثِّل دورة الخلية، ثم أُجيب عن الأسئلة الآتية:



أ- أكتب اسم الطور (في المرحلة البينية) الذي يشير إليه كلٌّ من الأرقام الآتية: 1، 2، 3.

ب- ما رقم الطور (1 - 4) الذي لا يحدث فيه استعداد لعملية الانقسام؟

جـ- ما رقم الطور الأطول في المرحلة البينية لدورة الخلية الظاهرة في الشكل؟

4. **أتوقَّع:** كيف يُسهِم غياب نقاط المُراقَبة في ظهور الأورام السرطانية؟
5. **أُقارِن** بين الطور الصفري وطور النمو الثاني كما في الجدول الآتي:

	الطور الصفري	طور النمو الثاني
أداء الخلية أنشطتها الطبيعية:		
الزيادة في كمِّية DNA:		
أداء الخلية الأنشطة التي تُهيِّئها للانقسام:		



الانقسام الخلوي وأهميته

Cell Division and its Importance

الفكرة الرئيسة:

للانقسام الخلوي أنواع عِدَّة، لكلٍّ منها أهميته في استمرار الحياة، وبقاء الأنواع الحيَّة المختلفة على سطح الأرض.

نتاجات التعلُّم:

- أُوضِّح أهمية الانقسام الخلوي في حياة الكائنات الحيَّة.
- أَصِف مراحل الانقسام الخلوي في الخلية.
- أُقارِن بين الانقسام المتساوي والانقسام المُنصِّف.
- أُوضِّح دور الانقسام المتساوي والانشطار الثنائي في تكاثر الكائنات الحيَّة لاجنسيًّا.

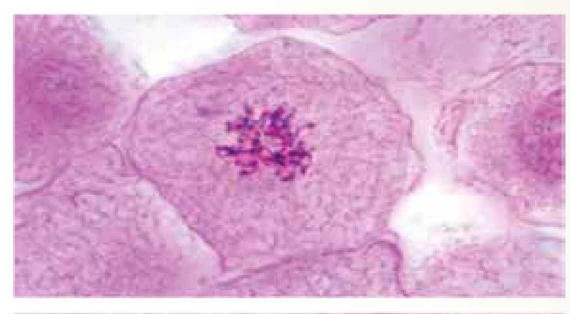
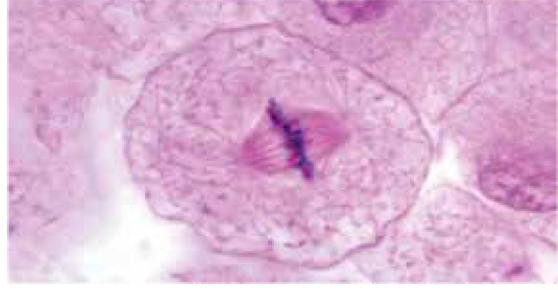
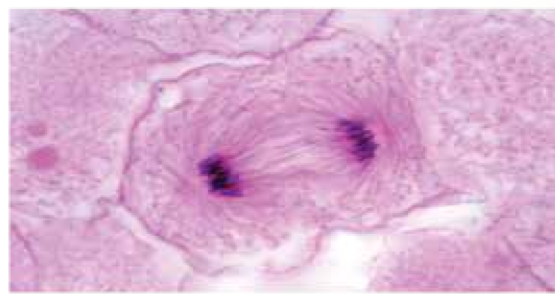
المفاهيم والمصطلحات:

انقسام السيتوبلازم	Cytokinesis
التجدُّد	Regeneration

الانقسام المتساوي Mitosis

يحدث انقسام متساوٍ في خلية ما لإنتاج خليتين مُطابِقتين جينيًّا للخلية المُنقسِمة، وتحوي كلٌّ منهما نفس عدد كروموسومات هذه الخلية.

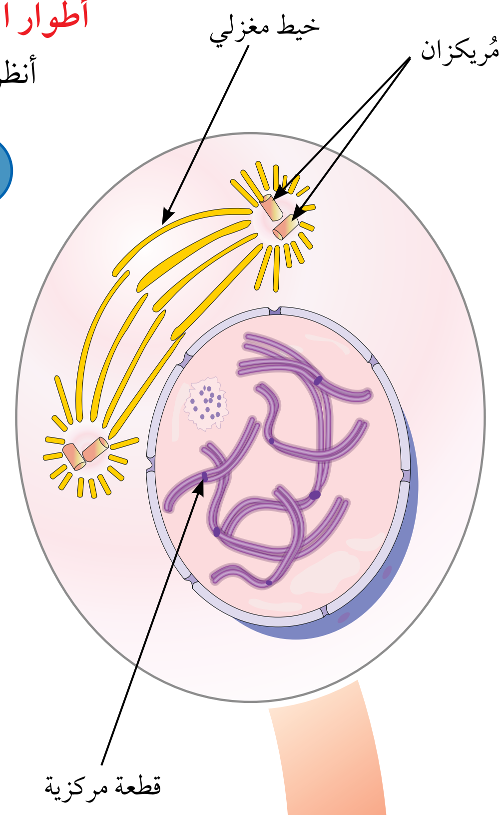
تمرُّ الخلية في أثناء الانقسام المتساوي بأربعة أطوار رئيسة مُتتابِعة، هي: الطور التمهيدي، والطور الاستوائي، والطور الانفصالي، والطور النهائي، أنظر الشكل (9)، يليها انقسام السيتوبلازم لإنتاج خليتين مُنفصِلتين.


الشكل (9): أطوار الانقسام المتساوي.

أطوار الانقسام المتساوي Phases of Mitosis

أنظر الشكل (10) الذي يُبيِّن أطوار الانقسام المتساوي، وسمات كل طور.



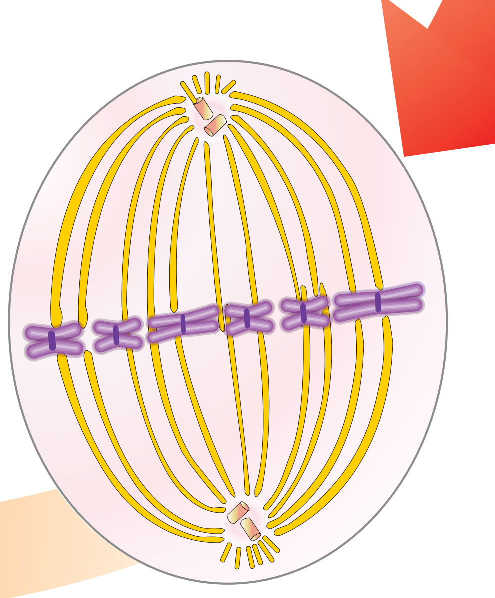
1 الطور التمهيدي Prophase

تظهر الكروموسومات قصيرة وسميكة، ويتكوَّن كلٌّ منها من كروماتيدين شقيقين يرتبطان معًا عن طريق قطعة مركزية (سنترومير).

في نهاية هذا الطور يتفكَّك الغلاف النووي، وتختفي النُوَيَّة، ويتحرَّك الجسمان المركزيان Centrosomes (الجسم المركزي تركيب يقتصر وجوده على الخلايا الحيوانية فقط، ويتكوَّن كل جسم مركزي من تركيبين أسطوانيين، يُسمّى كلٌّ منهما مُريكزًا) نحو قطبي الخلية المُتقابِلين، وتبدأ الخيوط المغزلية بالامتداد من المُريكِزات إلى القطع المركزية في الكروموسومات.

2 الطور الاستوائي Metaphase

يمتاز هذا الطور بارتباط الخيوط المغزلية بالقطع المركزية، وترتُّب الكروموسومات في وسط الخلية.



الشكل (10): أطوار الانقسام المتساوي، وسمات كل طور.

الطور النهائي Telophase 4

تتشكَّل في هذا الطور نواتان ونُوَيَّتان، ويبدأ الغلاف النووي بالظهور، وتصبح الكروموسومات أرفع وأطول تمهيدًا لعودتها على شكل شبكة كروماتينية. وفي نهاية الطور يبدأ انقسام السيتوبلازم بعد وقت قصير من انقسام النواة.

منطقة التخصُّر

خليتان ابنتان

الطور الانفصالي Anaphase 3

تنكمش الخيوط المغزلية في هذا الطور؛ ما يؤدّي إلى سحب الكروماتيدات الشقيقة، وانفصال كل كروماتيدين شقيقين أحدهما عن الآخر، وتحرُّك كلٍّ منهما نحو أحد قطبي الخلية، فيصبح عند كل قطب مجموعة كاملة من الكروموسومات الابنة Daughter Chromosomes. يُذكَر أنَّ الكروماتيدات في هذا الطور يكون شكلها مشابهًا لشكل حرف (V) نتيجة عملية السحب.

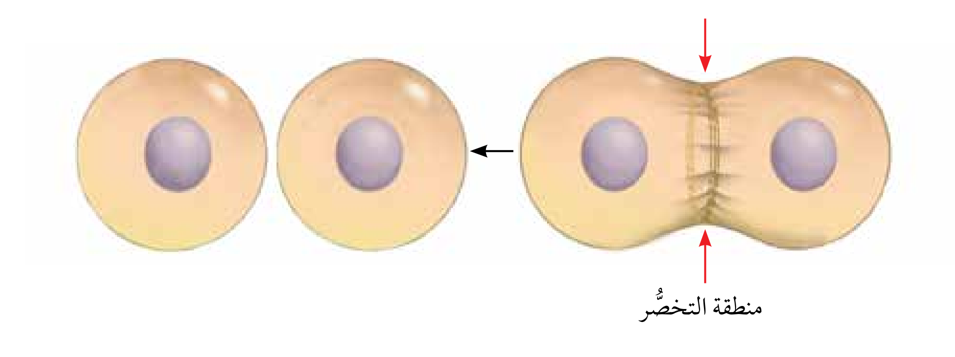
كروموسومات ابنة

أُفكِّر: في أيِّ أطوار المرحلة البينية تُصنَّع البروتينات التي تدخل في تركيب الخيوط المغزلية؟

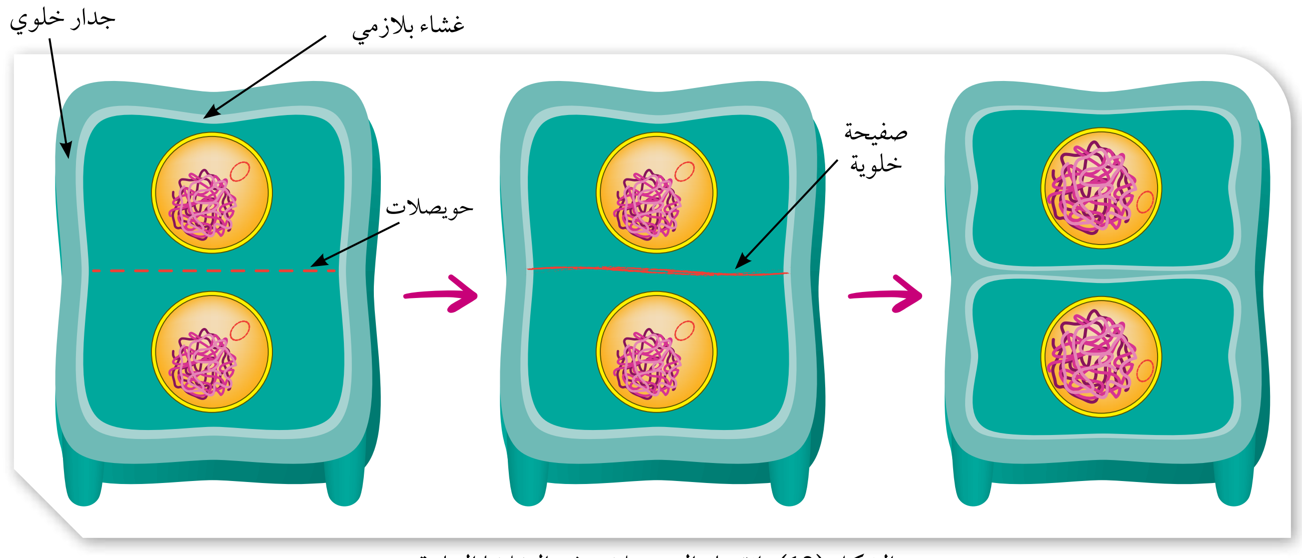
انقسام السيتوبلازم Cytokinesis

يختلف انقسام السيتوبلازم في الخلايا الحيوانية عنه في الخلايا النباتية؛ ففي الخلايا الحيوانية يحدث تخصُّر تدريجي وسط الخلية مُشكِّلًا أُخدودًا.

يوجد في الجانب السيتوبلازمي للأُخدود حلقة مُنقبِضة من ألياف بروتين الأكتين الدقيقة وجزيئات بروتين الميوسين التي تعمل معًا على انقباض الحلقة، فيزداد التخصُّر، إلى أنْ ينتج من ذلك خليتان مُنفصِلتان، أنظر الشكل (11).



الشكل (11): انقسام السيتوبلازم في الخلايا الحيوانية.



الشكل (12): انقسام السيتوبلازم في الخلايا النباتية.

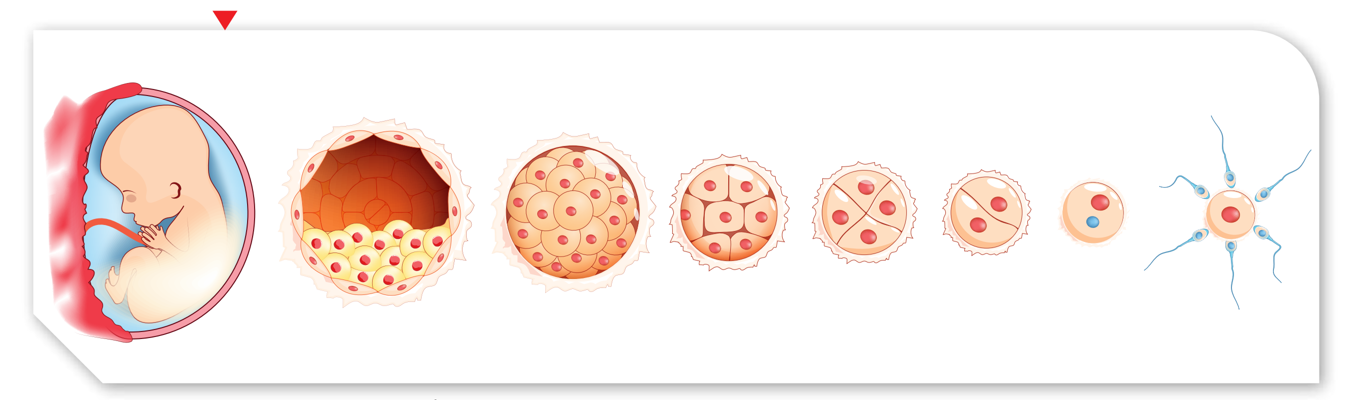
أمّا عملية انقسام السيتوبلازم في الخلايا النباتية فتختلف بسبب وجود الجُدُر الخلوية؛ إذ تصطفُّ وسط الخلية حويصلاتٌ من أجسام غولجي، ثم تندمج الحويصلات مُشكِّلةً صفيحة خلوية. بعد ذلك يندمج الغشاء المحيط بالصفيحة الخلوية بالغشاء البلازمي للخلية، ثم ينشأ الجدار الخلوي من مُكوِّنات في الصفيحة الخلوية. وبذلك تنتج خليتان مُنفصِلتان، ومُطابِقتان للخلية الأُمِّ، أنظر الشكل (12).

أتحقَّق: كيف ينقسم السيتوبلازم في الخلية الحيوانية؟

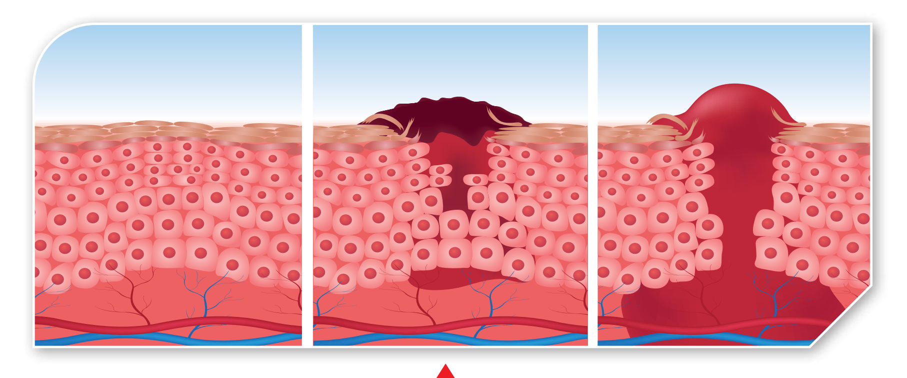
أهمية الانقسام المتساوي The Importance of Mitosis

للانقسام المتساوي أهميــة كبيرة؛ فهــو ضروري لنمو الكائنات الحيَّة عديدة الخلايا، أنظر الشكل (13) الذي يُبيِّن دور الانقســام المتساوي فـي تطوُّر جنين من بويضة مُخصَّبة (خلية واحدة) إلى إنسان يتكوَّن جسمه من عدد كبير جدًّا من الخلايا. قال تعـالى: ﴿وَلَقَدْ خَلَقْنَا الْإِنسَانَ مِن سُلَالَةٍ مِّن طِينٍ ۝ ثُمَّ جَعَلْنَاهُ نُطْفَةً فِي قَرَارٍ مَّكِينٍ ۝ ثُمَّ خَلَقْنَا النُّطْفَةَ عَلَقَةً فَخَلَقْنَا الْعَلَقَةَ مُضْغَةً فَخَلَقْنَا الْمُضْغَةَ عِظَامًا فَكَسَوْنَا الْعِظَامَ لَحْمًا ثُمَّ أَنشَأْنَاهُ خَلْقًا آخَرَ ۚ فَتَبَارَكَ اللَّهُ أَحْسَنُ الْخَالِقِينَ ۝﴾ (سورة المؤمنون، الآيات 12-14)

الشكل (13): تطوُّر جنين إنسان من بويضة مُخصَّبة بالانقسام المتساوي.



تتمثَّل أهميــة الانقــسام المتســاوي أيضًا في استبدال الخلايا التالفة، وتعويض الأنسجة التي تعرَّضت لجرح، أو حرق، أو كشط، مثل: الجلد، والأنسجة المُبطِّنة للأمعاء، أنظر الشكل (14).



الشكل (14): تعويض الأنسجة التالفة بالانقسام المتساوي.

أتحقَّق: ما أهميــة الانقســام المتساوي في جسمي؟

يُذكَر أنَّ بعض الكائنات الحيَّة عديدة الخلايا (مثل: السحلية، ونجم البحر) لديها قدرة على **التجدُّد Regeneration**؛ أيْ تعويض أجزاءٍ فَقَدَتْها من أجسـامها عن طريق الانقسام المتساوي، أنظر الشكل (15).

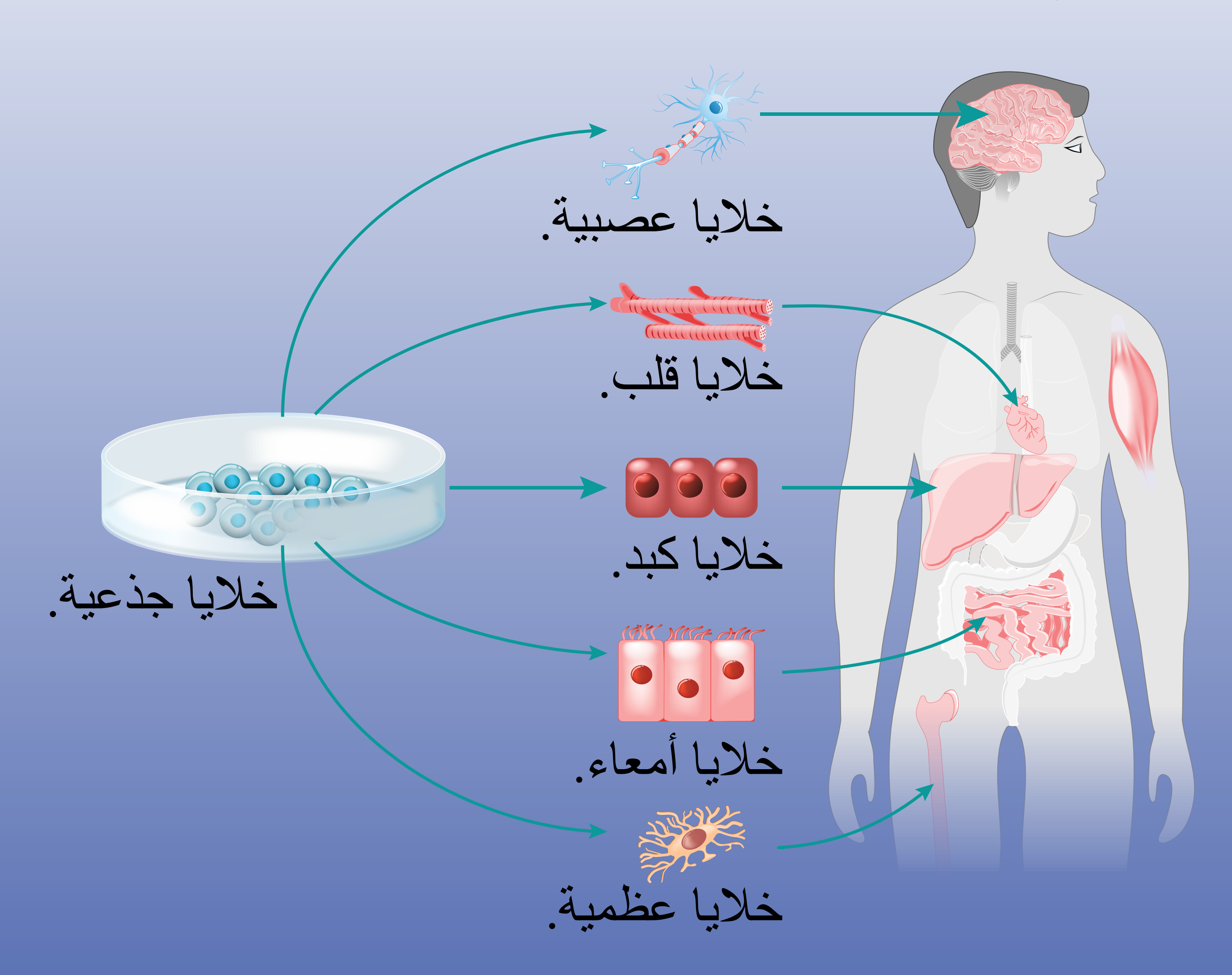


الشكل (15): سحلية تُجدِّد ذيلًا عِوَضًا عن ذيلها الأصلي المقطوع.

الربط بالطب

يوجد في المراحل الجنينية للكائن الحيِّ خلايا جذعية غير مُتمايِزة، وقد تنقسم هذه الخلايا لإنتاج خلايا تستمر بوصفها خلايا جذعية، وخلايا أُخرى تتمايز؛ ما يجعلها خلايا مُتخصِّصة، تتكوَّن منها الأنسجة والأعضاء.

يُعَدُّ استخدام الخلايا الجذعية في إنتاج أنسجة جديدة علاجًا واعدًا للأعضاء المُتضرِّرة نتيجة الإصابة بأمراض مُتعدِّدة، مثل بعض أمراض القلب والأعصاب. يوجد في الأردن عدد من المراكز والمؤسسات المُتقدِّمة والرائدة في مجال بحوث الخلايا الجذعية وتطبيقاتها العلاجية، وهي تضمُّ نخبة من الخبرات العلمية والعملية التي تُطبِّق أحدث الطرائق المُستخدَمة عالميًّا في مجال العلاج بالخلايا الجذعية.



يُعَدُّ الانقسام المتساوي أساسًا للتكاثر اللاجنسي في الكائنات الحيَّة حقيقية النوى؛ سواء أكانت وحيدة الخلية مثل الخميرة، أنظر الشكل (16/ أ)، أم عديدة الخلايا مثل الهيدرا والنباتات، أنظر الشكل (16/ ب، ج).

يكون تكاثر الكائنات الحيَّة لاجنسيًّا أسرع من تكاثرها جنسيًّا، ولكنَّ الكائنات الحيَّة الناتجة من التكاثر اللاجنسي تكون مُتماثِلة جينيًّا؛ ما يعني عدم وجود تنوُّع في صفات هذه الكائنات، وهو ما يجعل كُلًّا منها عُرْضةً للتأثُّر بالظروف المحيطة بها على نحوٍ مُشابِهٍ.

أُعِدُّ عرضًا تقديميًّا (Power Point) عمّا تعلَّمْتُه عن أهمية الانقسام المتساوي ودوره في تكاثر الكائنات الحيَّة لاجنسيًّا.


(أ) تكاثر الخميرة بالتبرعم.
(ب) تكاثر الهيدرا بالتبرعم.
(ج) تكاثر نباتات بالأبصال.

الشكل (16): أمثلة على تكاثر كائنات حقيقية النوى لاجنسيًّا.

الانقسام المُنصِّف Meiosis

يُعَدُّ الانقسام المُنصِّف أحد أنواع الانقسام الخلوي الذي يؤدّي إلى إنتاج الجاميتات؛ وهي خلايا أُحادية المجموعة الكروموسومية.

يمرُّ الانقسام المُنصِّف بمرحلتين أساسيتين، تسبق أُولاهما مرحلة بينية مُشابِهة لتلك التي تسبق الانقسام المتساوي.

أطوار المرحلة الأولى من الانقسام المُنصِّف Phases of Meiosis I

تمرُّ هذه المرحلة بأربعة أطوار، وتنتج في نهايتها خليتان تحويان نصف عدد كروموسومات الخلية الأُمِّ (المُنقسِمة)، أنظر الشكل (17).

الطور التمهيدي الأوَّل Prophase I

تظهر الكروموسومات قصيرة وسميكة، ويتكوَّن كلٌّ منها من كروماتيدين شقيقين، في حين يتفكَّك الغلاف النووي.

وقد يحدث تقاطع بين كروماتيدين غير شقيقين في كروموسومين متماثلين - بسبب قربهما من بعضهما- في نقاط تُسمّى كلٌّ منها منطقة التصالب Chiasma فينتج عن ذلك تبادل أجزاء من المادة الوراثية بين هذين الكروماتيدين، في ما يُعرَف بالعبور Crossing Over الذي تنتج منه تراكيب جينية جديدة تؤدّي دورًا في التنوُّع الجيني، أنظر الشكل (18).

يتحرَّك كل زوج من المُريكِزات نحو أحد قطبي الخلية المُتقابِلين، وتبدأ الخيوط المغزلية بالامتداد من المُريكِزات إلى القطع المركزية في الكروموسومات.

الطور الاستوائي الأوَّل Metaphase I

تصطفُّ أزواج الكروموسومات المُتماثِلة والمُرتبِطة بالخيوط المغزلية على جانبي خطِّ وسط الخلية، من دون أنْ تترتَّب ترتيبًا مُعيَّنًا، وإنَّما يكون ترتيبها عشوائيًّا؛ أيْ ليس شرطًا أنْ تكون جميع الكروموسومات التي من الأب على الجانب نفسه، وكذا الحال بالنسبة إلى الكروموسومات التي من الأُمِّ. وهذا يعني أنَّ جهة ما قد تحوي كروموسومات من الأب والأُمِّ؛ ما يؤدّي إلى حدوث تنوُّع جيني في الخلايا الناتجة من الانقسام.

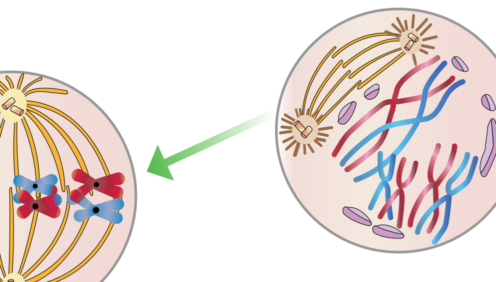
الطور الانفصالي الأوَّل Anaphase I

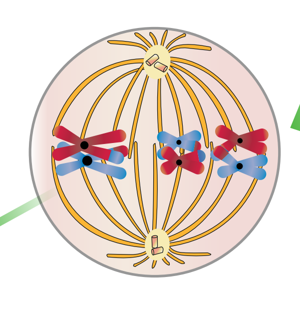
تنفصل في هذا الطور أزواج الكروموسومات المُتماثِلة نتيجة انكماش الخيوط المغزلية، ويتجه كل كروموسوم من هذه الأزواج إلى أحد قطبي الخلية، في حين تظلُّ الكروماتيدات الشقيقة مُرتبِطة ببعضها.

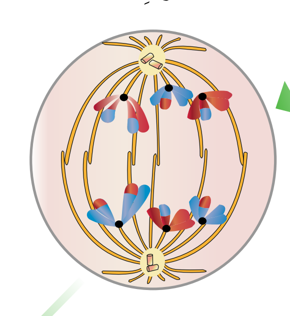
الطور النهائي الأوَّل Telophase I

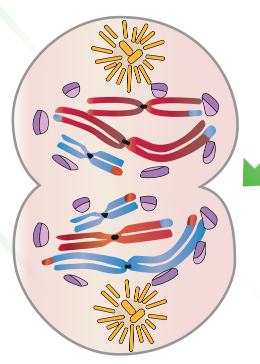
يبدأ الغلاف النووي بالظهور في هذا الطور تزامنًا مع تفكُّك الخيوط المغزلية، ثم يحدث انقسام للسيتوبلازم، فتنتج خليتان تحوي كلٌّ منهما كروموسومات؛ بعضها من الأب، وبعضها الآخر من الأُمِّ.

الشكل (18): عملية العبور.









الشكل (17): أطوار المرحلة الأولى من الانقسام المُنصِّف.

أطوار المرحلة الثانية من الانقسام المُنصِّف
Phases of Meiosis II

تدخل الخلايا المرحلة الثانية من الانقسام المُنصِّف من دون حدوث تضاعف DNA. وفي هذا الطور تنفصل الكروماتيدات الشقيقة بعضها عن بعض، ويتحرَّك كلٌّ منها نحو أحد قطبي الخلية، ثم يتكوَّن الغلاف النووي الذي يتبعه حدوث انقسام للسيتوبلازم، فتنتج أربع خلايا أُحادية المجموعة الكروموسومية.

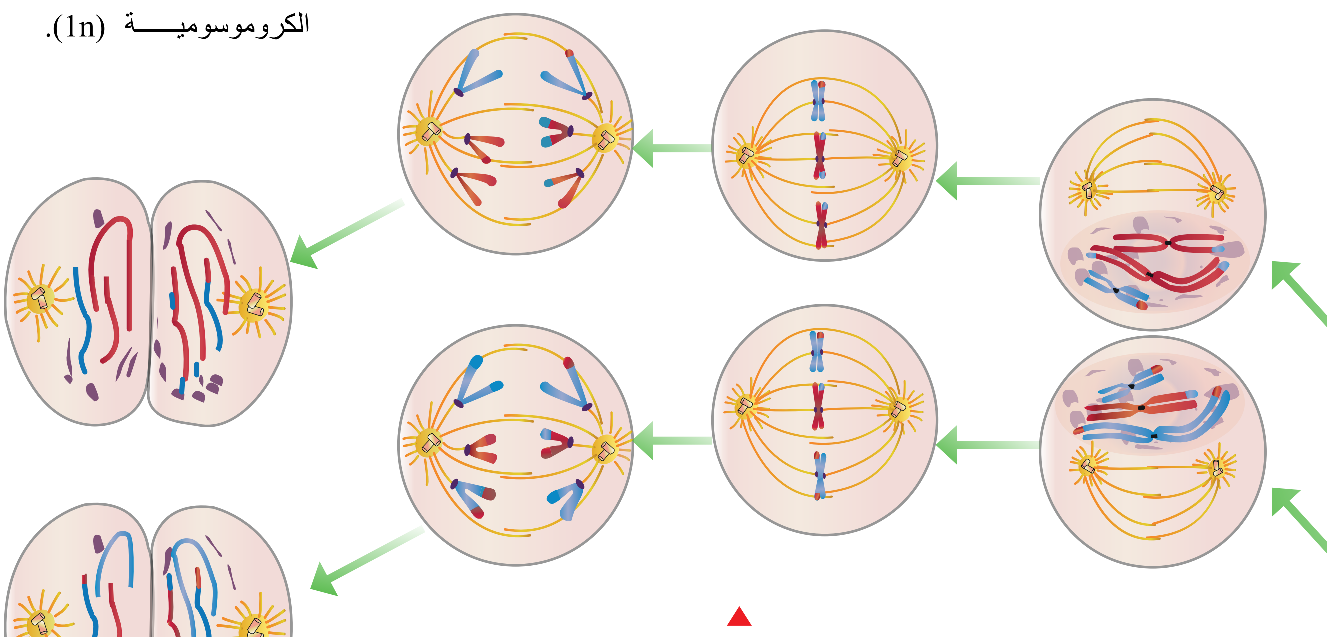
أتحقَّق: خلية جنسية تحوي (64) كروموسومًا:
- ما عدد الخلايا الناتجة في المرحلة الأولى من انقسامها انقسامًا مُنصِّفًا؟
- كم عدد الكروموسومات في كلٍّ من الخلايا الناتجة؟

الطور التمهيدي الثاني
Prophase II
يتفكَّك الغلاف النووي في هذا الطور، وتتجه المُريكِزات إلى أقطاب الخلية المُتقابِلة، وتبدأ الخيوط المغزلية بالظهور.

الطور الاستوائي الثاني
Metaphase II
تترتَّب الكروموسومات (لا يزال كلٌّ منها يتكوَّن من كروماتيدين شقيقين) في منتصف الخلية.

الطور الانفصالي الثاني
Anaphase II
ينفصل كل كروماتيدين شقيقين أحدهما عن الآخر، ثم يتحرَّك كلٌّ منهما نحو أحد قطبي الخلية.

الطور النهائي الثاني
Telophase II
يتشكَّل الغلاف النووي حول كل مجموعة كروموسومية، وتبدأ الخيوط المغزلية بالتفكُّك، ويحدث انقسام ثانٍ للسيتوبلازم، فتنتج أربع خلايا أُحادية المجموعة الكروموسومية (1n).



الشكل (19): أطوار المرحلة الثانية من الانقسام المُنصِّف.

خلية
2n
انقسام مُنصِّف
جاميت ذكري 1n
جاميت أنثوي 1n
انقسام متساوٍ
زيجوت 2n
إخصاب

الشكل (20): أهمية الانقسام المُنصِّف.

أهمية الانقسام المُنصِّف The Importance of Meiosis

يؤدّي انقسام خلية ثنائية المجموعة الكروموسومية انقسامًا مُنصِّفًا إلى إنتاج أربع خلايا أُحادية المجموعة الكروموسومية. فمثلًا، الخلايا المنوية الأولية في الإنسان هي ثنائية المجموعة الكروموسومية (2n)؛ أيْ إنَّ كُلًّا منها تحوي 23 زوجًا من الكروموسومات (46 كروموسومًا). وبعد حدوث انقسام مُنصِّف – بمرحلتيه – تنتج أربع خلايا أُحادية المجموعة الكروموسومية (1n)، وهي تُسمّى جاميتات ذكرية، ويحوي كلٌّ منها 23 كروموسومًا. وعند حدوث عملية الإخصاب التي يندمج فيها الجاميت الذكري بالجاميت الأنثوي تتكوَّن خلية ثنائية المجموعة الكروموسومية (2n) تُسمّى زيجوت، أنظر الشكل (20)، وبذلك يُمكِن المحافظة على ثبات عدد الكروموسومات في الكائن الحيِّ الطبيعي.

أتحقَّق: أُقارِن بين الطور الانفصالي الأوَّل والطور الانفصالي الثاني من حيث أبرز أحداث كلٍّ منهما.

الانشطار الثنائي في الكائنات الحيَّة بدائية النوى
Binary Fission in Prokaryotes

يتشابه الانشطار الثنائي والانقسام المتساوي من حيث نواتج العمليتين؛ إذ ينتج من كلٍّ منهما خليتان مُطابِقتان للخلية الأُمِّ المُنقسِمة، ولكنَّ هاتين العمليتين تختلفان فعليًّا في ما بينهما، أنظر الشكل (21) الذي يُبيِّن آليَّة الانشطار الثنائي في البكتيريا.

تبدأ عملية الانشطار الثنائي بتضاعف كروموسوم البكتيريا، وهو كروموسوم حلقي، ثم يتحرَّك الكروموسومان الناتجان من التضاعف في اتجاهين مُتقابِلين، ضمن عملية يدخل فيها بروتين يُشبِه الأكتين Actin – like Protein، فيظهر كروموسوم واحد عند كل طرف من طرفي الخلية المُتقابِلين، ويحدث في أثناء هذه العملية نمو واستطالة للخلية. بعد ذلك ينغمد الغشاء البلازمي نحو الداخل، بالتزامن مع تكوُّن الجدار الخلوي، ثم تنتج خليتان مُنفصِلتان ومُشابِهتان للخلية الأُمِّ.

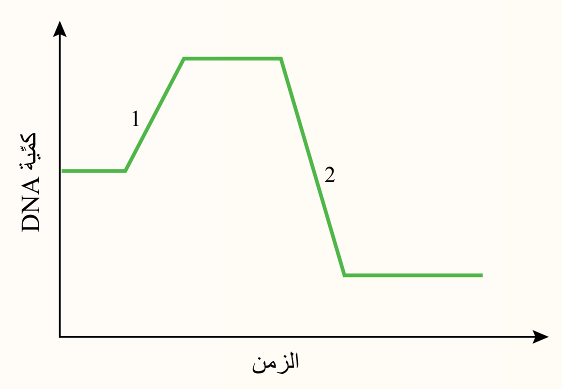
المادة الوراثية
الخلية الأُمُّ
الجدار الخلوي
الغشاء البلازمي
DNA مُتضاعِف
الخلايا الناتجة

الشكل (21): الانشطار الثنائي في البكتيريا.

أتحقَّق: ما نتائج انقسام خلية جلد ونتائج انشطار خلية بكتيريا من حيث عدد الخلايا الناتجة من عملية انقسام واحدة؟

مراجعة الدرس

1. **الفكرة الرئيسة**: ما أنواع الانقسام الخلوي في الكائنات حقيقية النوى؟ ما أهمية كل نوع منها؟
2. **أتوقَّع**: ماذا يستفيد الكائن الحيُّ إذا كان قادرًا على التكاثر جنسيًّا ولاجنسيًّا؟
3. **أستنتج**: إذا نَمَّيْتُ خلايا خميرة على طبقين غذائيين مُناسِبين، ثم أضفْتُ إلى أحدهما مادة كيميائية توقِف تضاعف المادة الوراثية، فكيف أستطيع تمييز الطبق الذي أضفْتُ إليه المادة الكيميائية؟
4. **أُقارِن** بين كلٍّ ممّا يأتي:
   أ- عملية الانقسام المتساوي، وعملية الانشطار الثنائي من حيث آليَّة الانقسام.
   ب- انقسام السيتوبلازم في الخلايا النباتية، وانقسامه في الخلايا الحيوانية.
   جـ- الخلايا الناتجة في الطور النهائي من الانقسام المتساوي، والخلايا الناتجة في الطور النهائي الأوَّل من الانقسام المُنصِّف من حيث عدد الكروموسومات في كلٍّ منها.
5. أدرس الشكل الآتي الذي يُبيِّن كمِّية DNA في خلية تمرُّ بسلسلة من العمليات خلال مدَّة من الزمن، ثم أُجيب عن السؤالين التاليين:



   أ- هل يُمثِّل الرقم (1) انقسامًا مُنصِّفًا، أو انقسامًا متساويًا، أو إخصابًا، أو تضاعف DNA؟
   ب- ما نوع الانقسام الذي يُمثِّله الرقم (2)؟



تضاعف DNA والتعبير الجيني
DNA Replication and Gene Expression

الفكرة الرئيسة:

يمتاز جزيء DNA بقدرته على التضاعف، وتُعَدُّ المعلومات التي يحملها هي الأساس في عمليات تصنيع الخلية للبروتينات. تحدث عملية التعبير الجيني في الخلية، وهي تختلف بين الخلايا تبعًا لاختلاف الأنشطة والوظائف التي تقوم بها كلٌّ منها.

نتاجات التعلُّم:

- أُبيِّن دور العلماء في اكتشاف المادة الوراثية وتضاعفها.
- أتتبَّع آليَّة تضاعف DNA في الخلية.
- أَصِف آليّات تصحيح اختلالات DNA.
- أستقصي آليَّة تصنيع البروتينات.
- أُبيِّن دور التعبير الجيني في تمايز الخلايا.

المفاهيم والمصطلحات:

تضاعف DNA Replication DNA

التضاعف شبه المُحافِظ Semiconservative Replication

البروتينات المُرتبِطة بالسلاسل المفردة Single Strand Binding Proteins

السلسلة الرائدة Leading Strand

السلسلة المُتأخِّرة Lagging Strand

التعبير الجيني Gene Expression

تمايز الخلايا Cell Differentiation

تضاعف DNA Replication DNA

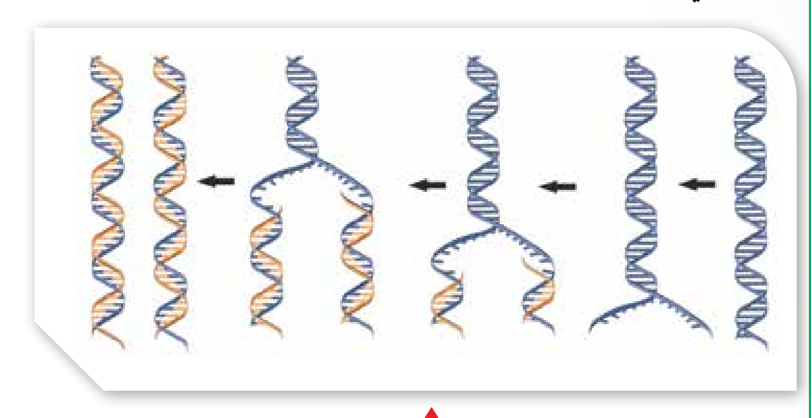
درسْتُ سابقًا أنَّ الخلية تمرُّ بطور التضاعف في أثناء المرحلة البينية من دورة الخلية. وفي هذا الطور تحدث عملية **تضاعف DNA Replication DNA**، وهي عملية تُنظِّمها إنزيمات عِدَّة.

تنتج من تضاعف جزيء DNA نسختان مُتماثِلتان، تتكوَّن كلٌّ منهما من سلسلتين؛ إحداهما من DNA الأصل (أيْ سلسلة أصلية)، والأُخرى جديدة ومُكمِّلة لها.

يُطلَق على عملية تضاعف DNA اسم **التضاعف شبه المُحافِظ Semiconservative Replication**؛ لأنَّ إحدى السلسلتين محفوظة، والأُخرى جديدة، أنظر الشكل (22).

يُعْزى إلى عملية التضاعف احتواءُ الخلايا الناتجة من الانقسام الخلوي DNA يحمل التعليمات الوراثية كاملةً بالرغم من حدوث عملية الانقسام.

اقترح العالِمان مِسلسون وستال Meselson and Stahl نموذجًا لكيفية تضاعف DNA، استنادًا إلى اكتشاف تركيب DNA على أيدي العالِمين واتسون وكريك، والنتائج العملية التي توصَّل إليها علماء آخرون في هذا المجال.



الشكل (22): تضاعف DNA.

أتحقَّق: أيُّ أطوار الخلية يحدث فيه تضاعف DNA؟



الشكل (23): عمل إنزيم الهيليكيز، والبروتينات المُرتبِطة بالسلاسل المفردة.

آليّة تضاعف Mechanism of DNA Replication DNA

تبدأ عملية تضاعف جزيء DNA بانفصال سلسلتيه المُتقابِلتين؛ إذ تتحطّم الروابط الهيدروجينية بين النيوكليوتيدات المُتقابِلة في السلسلتين بفعل إنزيم الهيليكيز Helicase الذي يحتاج إلى طاقة ATP لإتمام هذه العملية، أنظر الشكل (23).

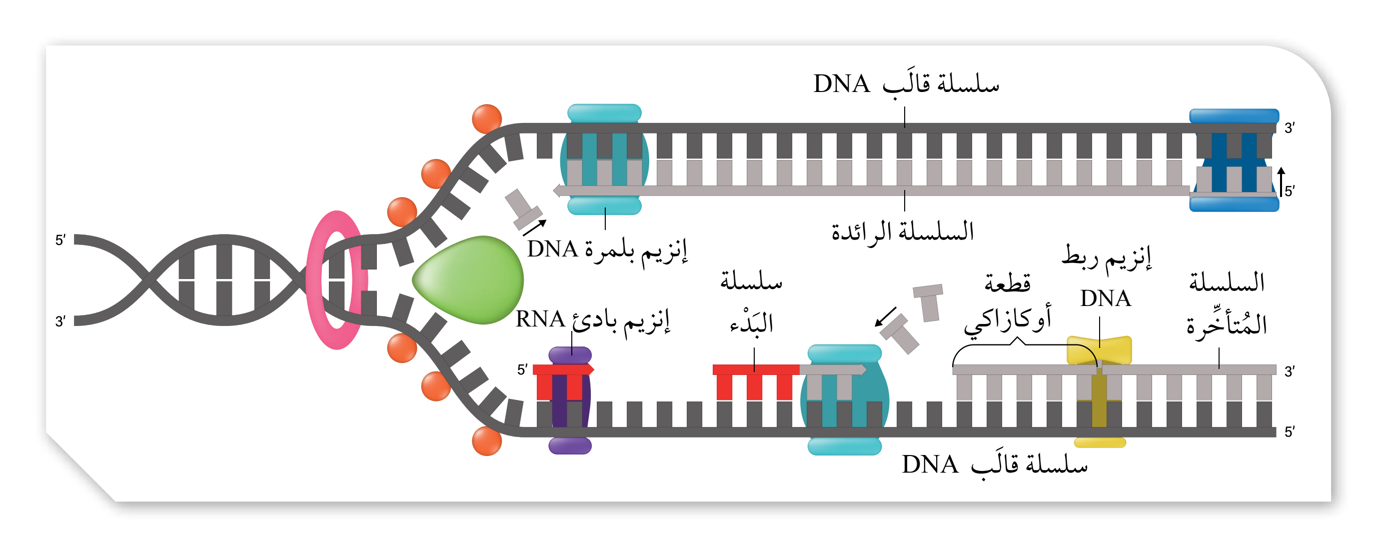
ينتج من هذا الانفصال سلسلتان مفردتان، ترتبط كلٌّ منهما ببروتينات خاصة تُسمّى **البروتينات المُرتبِطة بالسلاسل المفردة Single Strand Binding Proteins (SSBP)**، وهي تمنع عودة ارتباط السلسلتين إحداهما بالأُخرى، علمًا بأنَّ كل سلسلة مفردة تُمثِّل قالبًا لبناء سلسلة جديدة.

ولمّا كانت الإنزيمات المسؤولة عن تضاعف DNA غير قادرة على بَدْء هذه العملية، فإنَّ إنزيم بادئ RNA primase RNA يضيف قطعة صغيرة من RNA (تتكوَّن من (5-10) نيوكليوتيدات، وتُسمّى سلسلة البَدْء primer) إلى كل سلسلة من سلسلتي DNA المُكمِّلتين؛ لتوفير نهاية '3 حُرَّة، ثم يبدأ إنزيم آخر يُسمّى إنزيم بلمرة DNA polymerase DNA بإضافة نيوكليوتيدات مُكمِّلة لنيوكليوتيدات السلسلة القالَب.

يكون بناء سلسلة DNA المُكمِّلة (الجديدة) مُتَّجِهًا دائمًا من ′5 إلى ′3، فتنتج سلسلة مُتَّصِلة تُسمّى **السلسلة الرائدة Leading Strand**، وتكون مُكمِّلة لإحدى سلسلتي القالَب، أنظر الشكل (24).

أُفكِّر: ما النتائج المُتوقَّعة من حدوث طفرة في البروتينات المُرتبِطة بالسلاسل المفردة تمنعها من الارتباط بسلسلة DNA المفردة؟

أتحقَّق: ما دور إنزيم الهيليكيز في عملية تضاعف DNA؟



الشكل (24): بناء السلسلة الرائدة، والسلسلة المُتأخِّرة.

أُفسِّر سبب تكوُّن قطع أوكازاكي.

لا يستطيع إنزيم بلمرة DNA بناء سلسلة في اتجاه معاكس (أيْ من ′3 إلى ′5)؛ لذا فإنَّ بناء السلسلة المُكمِّلة للسلسلة القالَب الأُخرى يكون مختلفًا؛ إذ يكون على هيئة قطع غير مُتَّصِلة تُسمّى قطع أوكازاكي Okazaki Fragments (نسبةً إلى العالِم الذي اكتشفها)، وتُسمّى هذه السلسلة المُكمِّلة **السلسلة المُتأخِّرة Lagging Strand**، أنظر الشكل (24).

تحتاج عملية بناء السلسلة المُتأخِّرة إلى أكثر من سلسلة بَدْء؛ إذ تُضاف سلسلة بَدْء جديدة في كل مَرَّة يفصل فيها إنزيم الهيليكيز جزءًا من سلسلتي DNA الأصليتين إحداهما عن الأُخرى، ليستأنف إنزيم بلمرة DNA عملية بناء قطع أوكازاكي من ′5 إلى ′3.

بعد ذلك تُزال سلاسل البَدْء، وتوضَع نيوكليوتيدات DNA مكانها، ثم تُربَط قطع أوكازاكي باستعمال إنزيم ربط DNA Ligase DNA الذي يربط قطعًا بأُخرى مجاورة عن طريق تكوين روابط فوسفاتية ثنائية الإستر. بعد انتهاء بناء السلسلة الرائدة والسلسلة المُتأخِّرة، ينتج جزيئا DNA مُتماثِلان، يتكوَّن كلٌّ منهما من سلسلة أصلية، وأُخرى جديدة مُكمِّلة لها.

✓ **أتحقَّق:** لماذا تُبْنى إحدى سلسلتي DNA على شكل قطع غير مُتَّصِلة؟

تختلف طريقة تضاعف DNA في السلسلة الرائدة عنها في السلسلة المُتأخِّرة. أبحث في مصادر المعرفة المُناسِبة عن مقاطع فلمية تُبيِّن تضاعف كلٍّ من السلسلتين، ثم أُعِدُّ فلمًا قصيرًا عن ذلك باستخدام برنامج (movie maker) ثم أعرضه أمام زملائي/ زميلاتي في الصف.



محاكاة عملية تضاعف DNA

يتضاعف جزيء DNA مُنتِجًا نسختين مُتماثِلتين، تتكوَّن كلٌّ منهما من سلسلتين؛ إحداهما أصلية (أيْ من DNA الأصل)، والأُخرى جديدة ومُكمِّلة لها. وتُعَدُّ كل سلسلة أصلية في أثناء التضاعف قالَبًا لبناء سلسلة مُكمِّلة جديدة. وبينما يكون بناء إحدى السلسلتين مستمرًّا، يكون بناء السلسلة المُقابِلة مُتقطِّعًا.

المواد والأدوات:

مقص، شريط لاصق، أقلام مُلوَّنة، قالَب نيوكليوتيدات كما في الصندوق التالي.

إرشادات السلامة: استعمال المقص بحذر.

خطوات العمل:

1 أُصمِّم نموذجًا:

- أُعِدُّ نسخًا من الشكل المجاور الذي يُمثِّل أنواع النيوكليوتيدات في DNA، علمًا بأنَّ عدد النسخ يعتمد على طول سلسلتي DNA المراد نمذجة تضاعفهما.
- أَقُصُّ الأشكال على نحوٍ يجعل النيوكليوتيدات مُنفصِلة.
- أُرتِّب هذه النيوكليوتيدات في سلسلتين، مُراعِيًا ربط كل نيوكليوتيد بالنيوكليوتيد المجاور له في السلسلة نفسها، ثم أُثبِّت كل نيوكليوتيدين باستخدام الشريط اللاصق.
- أضع النيوكليوتيدات في السلسلة المُقابِلة على نحوٍ يجعلها مُكمِّلة للنيوكليوتيدات في السلسلة الأولى، مُراعِيًا أنْ تكون نهايتا ′3 و′5 مُتعاكِستين في السلسلتين المُتقابِلتين.

2 أُلاحِظ الشكل الناتج.

3 أُجرِّب استعمال النيوكليوتيدات المُتبقِّية لتمثيل تضاعف السلسلتين، وتكوين سلسلتين جديدتين.

4 أفصل السلسلتين إحداهما عن الأُخرى جزئيًّا، ثم أُضيف النيوكليوتيدات لبناء السلسلة المُقابِلة للسلسلة الأصلية، مُراعِيًا أنْ يكون اتجاه الإضافة من ′3 إلى ′5 على سلسلة القالَب؛ أيْ من ′5 إلى ′3 للنيوكليوتيدات المضافة.

التحليل والاستنتاج:

1. **أُقارِن:** أيُّ السلسلتين عملية بنائها مُتَّصِلة منذ البداية؟ أيُّهما عملية بنائها مُتقطِّعة؟
2. **أتوقَّع:** أفصل الجزء المُتبقّي من السلسلتين المُتقابِلتين، ثم أُحدِّد السلسلة التي قد يستمر بناؤها، وتلك التي سيتوقَّف بناؤها، وتتطلَّب البَدْء من جديد.
3. **أستنتج:** أيُّ السلسلتين رائدة؟ أيُّهما مُتأخِّرة؟
4. **أتواصل:** أُناقِش زملائي/ زميلاتي في النتائج التي توصَّلْتُ إليها.

تصحيح اختلالات DNA Damage Repair DNA

توجد آليّات عديدة تعمل على تصحيح اختلالات DNA الناجمة عن تلف جزء من سلسلة DNA؛ نتيجة تعرُّض الكائن الحيِّ لعوامل كيميائية ضارَّة، مثل: سموم بعض الفطريات، والتبغ، أو تعرُّضه لعوامل فيزيائية، مثل: الأشعة السينية (X)، والأشعة فوق البنفسجية (UV). عندئذٍ، يُقطَع الجزء التالف من سلسلة DNA عن طريق إنزيم النيوكليز Nuclease، ثم تُسَدُّ الفجوة الناتجة من عملية القطع بنيوكليوتيدات مُكمِّلة للسلسلة المُقابِلة غير التالفة باستعمال إنزيم بلمرة DNA، وإنزيم ربط DNA. يُطلَق على آليَّة التصحيح هذه اسم تصحيح استئصال النيوكليوتيد Nucleotide Excision Repair، أنظر الشكل (25).

✓ **أتحقَّق:** ما الإنزيمات التي تعمل على سَدِّ الفجوات الناجمة عن قطع الجزء التالف من سلسلة DNA؟

الشكل (25): تصحيح استئصال النيوكليوتيد.

تجدر الإشارة إلى وجود آليّات تستخدمها الخلية في تصحيح اختلالات تضاعف DNA.

يُمثِّل الشكل (26) مُلخَّصًا لاختلالات DNA، وآليّات تصحيحها في الخلية.

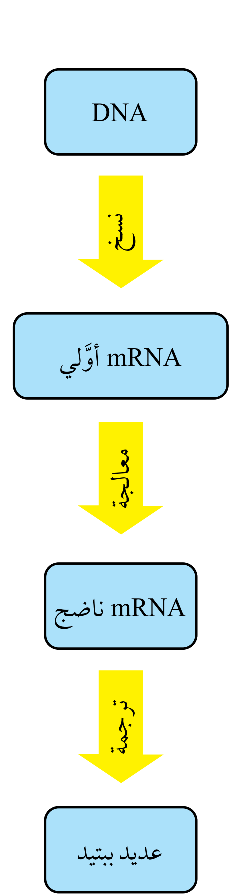
الشكل (26): اختلالات DNA، وآليّات تصحيحها.

تصنيع البروتينات Protein Synthesis

يُنظِّم DNA أنشطة الخلية والعمليات الحيوية التي تحدث فيها؛ ذلك أنَّه يحمل التعليمات اللازمة لتصنيع البروتينات في صورة نيوكليوتيدات وَفق تسلسل مُعيَّن، وتُسمّى هذه التعليمات الشيفرة الوراثية. تؤدّي البروتينات أدوارًا مُهِمَّةً في أجسام الكائنات الحيَّة، وفي الخلايا المُكوِّنة لها، إضافةً إلى دورها في تنظيم دورة الخلية.

تمرُّ عملية تصنيع البروتينات بمرحلتين رئيستين، هما: النسخ Transcription، والترجمة Translation، وتوجد بينهما مرحلة يُعالَج فيها الحمض النووي RNA، أنظر الشكل (27).

يُذكَر أنَّ عملية النسخ ضرورية أيضًا لإنتاج جميع أنواع الحمض النووي RNA، والتي تختلف بطرائق معالجتها. إلّا أنَّ الحمض النووي mRNA هو من تحدث له عملية الترجمة لتصنيع البروتينات.



الشكل (27): مراحل تصنيع البروتينات.

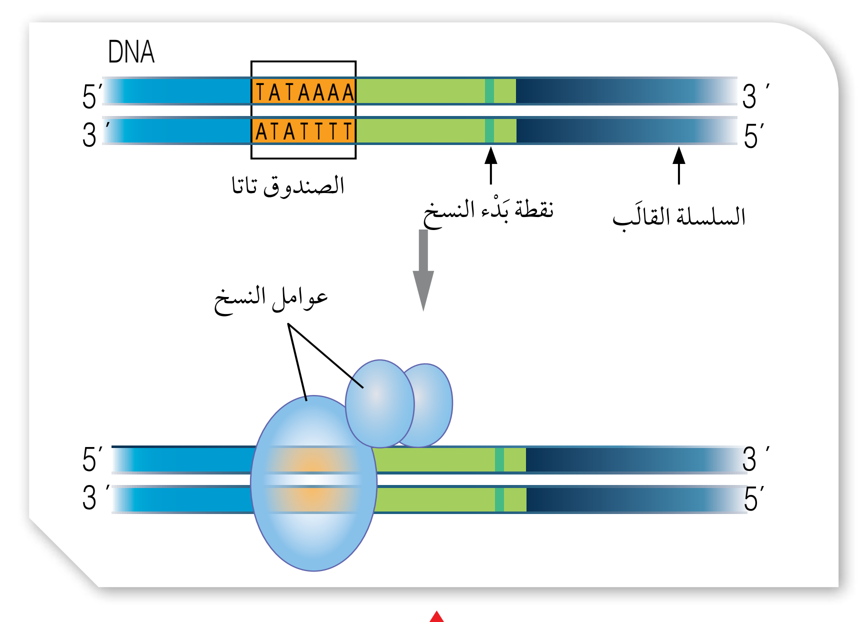
النسخ Transcription

يُطلَق على عملية إنتاج جزيء RNA مُكمِّل لجزء من إحـــدى سلسلتي DNA باستعمال إنزيمات بلمرة RNA اسم **النسخ Transcription**.

تحدث هذه العملية في النواة، وتتألَّف من ثلاث خطوات، هي: بَدْء عملية النسخ، واستطالة RNA، وانتهاء عملية النسخ.

بَدْء عملية النسخ Initiation of Transcription

تبدأ عمليـــة النســـخ عنــد تعرُّف بروتينـــات مُعيَّنة (تُســمّى عوامــــل النســــخ Transcription Factors) تســــلسلًا مُعيَّنًا مـن النيوكليوتيدات في DNA، وهو تسلسل يوجد قبــل نقطــة بَدْء النسخ، ومن الأمثلة عليه في الخلايا حقيقية النوى: الصندوق كات (CAAT BOX)، والصنــــدوق تـاتــا (TATA BOX). وتُعْــزى تسمية كلٍّ منهما إلى النيوكليوتيدات المُكـــوِّنة لهما، أنــظر الشكل (28).



الشكل (28): تعرُّفُ عواملِ النسخِ تسلسلَ نيوكليوتيدات قبل نقطة بدء النسخ.

الشكل (29): بَدْء عملية النسخ.

يرتبط إنزيم بلمرة RNA بموقعه المُناسِب، وترتبط به عوامل نسخ أُخرى؛ ما يؤدّي إلى تكوُّن مُعقَّد بَدْء النسخ Transcription Initiation Complex. بعد ذلك يبدأ إنزيم بلمرة RNA بفكِّ التفاف سلسلتي DNA، وتبدأ عملية نسخ mRNA الأوَّلي من نقطة بدء النسخ على السلسلة القالَب، أنظر الشكل (29).

أُفكِّر: ماذا سيحدث لعملية النسخ في حال عدم توافر أحد عوامل النسخ؟

استطالة RNA Elongation of RNA

يبدأ إنزيم بلمرة RNA بالتحرُّك مُتَّجِهًا من ′3 إلى ′5 على سلسلة DNA القالَب، ثم يضيف نيوكليوتيدات جديدة إلى النهاية ′3 في جزيء RNA، أنظر الشكل (30).

الشكل (30): استطالة RNA.

تحتوي النيوكليوتيدات المضافة إلى سلسلة RNA على قواعد نيتروجينية مُكمِّلة للقواعد النيتروجينية في سلسلة DNA، غير أنَّ القاعدة النيتروجينية المُكمِّلة للأدنين تكون اليوراسيل في RNA وذلك عوضًا عن الثايمين.

أتحقَّق: أُوضِّح مراحل عملية النسخ، ثم أكتب سلسلة RNA الناتجة من نسخ سلسلة DNA الآتية.



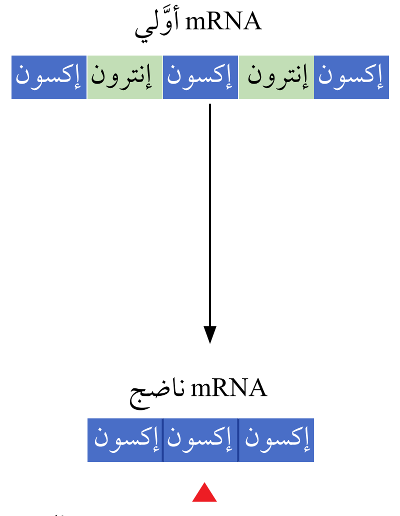
انتهاء عملية النسخ Termination of Transcription

عند انتهاء عملية النسخ المطلوبة يتوقَّف إنزيم بلمرة RNA عن العمل، ويبتعد RNA المنسوخ عن سلسلة DNA القالَب، ويُطلَق على RNA الناتج اسم mRNA الأوَّلي.

معالجة RNA Processing RNA

يخضع جزيء mRNA الأوَّلي لعملية معالجة في النواة قبل أنْ يصبح جزيء mRNA ناضجًا mature mRNA يُمكِن ترجمته.

تتضمَّن عملية المعالجة إزالة قطع من mRNA، تُسمّى كلٌّ منها الإنترون Intron، وهي أجزاء غير فاعلة في تصنيع البروتين المطلوب؛ ما يعني بقاء الأجزاء الفاعلة فقط في تصنيع البروتين المطلوب، التي يُعرَف كلٌّ منها باسم الإكسون Exon. بعد ذلك تُربَط قطع الإكسون المُتبقِّية بعضها ببعض، فينتج جزيء mRNA ناضج يخرج من النواة إلى السيتوبلازم عن طريق الثقوب النووية الموجودة في الغلاف النووي؛ تمهيدًا لبَدْء عملية الترجمة، أنظر الشكل (31).



الشكل (31): معالجة mRNA الأوَّلي.

أتحقَّق: أين تحدث عملية ترجمة mRNA؟

الترجمة Translation

يُطلَق على العملية التي تُستخدَم فيها المعلومات الوراثية التي يحملها mRNA لتصنيع سلسلة عديد الببتيد اسم **الترجمة Translation**، ويُطلَق على كل ثلاثة نيوكليوتيدات مُتتابِعة في mRNA يُمكِن أنْ تُترجَم إلى حمض أميني أو إشارة وقف (Stop) اسم **الكودون Codon**، أنظر الشكل (32).

	U	C	A	G	
U	UUU Phe فينيل ألانين	UCU Ser سيرين	UAU Tyr تايروسين	UGU Cys سيستين	U
	UUC Phe فينيل ألانين	UCC Ser سيرين	UAC Tyr تايروسين	UGC Cys سيستين	C
	UUA Leu ليوسين	UCA Ser سيرين	UAA Stop	UGA Stop	A
	UUG Leu ليوسين	UCG Ser سيرين	UAG Stop	UGG Trp تريبتوفان	G
C	CUU Leu ليوسين	CCU Pro برولين	CAU His هستدين	CGU Arg أرغنين	U
	CUC Leu ليوسين	CCC Pro برولين	CAC His هستدين	CGC Arg أرغنين	C
	CUA Leu ليوسين	CCA Pro برولين	CAA Gln غلوتامين	CGA Arg أرغنين	A
	CUG Leu ليوسين	CCG Pro برولين	CAG Gln غلوتامين	CGG Arg أرغنين	G
A	AUU Ile ايسوليوسين	ACU Thr ثريونين	AAU Asn اسبارغنين	AGU Ser سيرين	U
	AUC Ile ايسوليوسين	ACC Thr ثريونين	AAC Asn اسبارغنين	AGC Ser سيرين	C
	AUA Ile ايسوليوسين	ACA Thr ثريونين	AAA Lys لايسين	AGA Arg أرغنين	A
	AUG Met ميثيونين Start	ACG Thr ثريونين	AAG Lys لايسين	AGG Arg أرغنين	G
G	GUU Val فالين	GCU Ala الانين	GAU Asp حمض أسبارتيك	GGU Gly غلايسين	U
	GUC Val فالين	GCC Ala الانين	GAC Asp حمض أسبارتيك	GGC Gly غلايسين	C
	GUA Val فالين	GCA Ala الانين	GAA Glu حمض غلوتاميك	GGA Gly غلايسين	A
	GUG Val فالين	GCG Ala الانين	GAG Glu حمض غلوتاميك	GGG Gly غلايسين	G

الشكل (32): الكودونات، ونواتج ترجمة كلٍّ منها.

تشتمل أنواع RNA على نوع يُسمّى RNA الناقل tRNA، وهو المُترجِم في هذه العملية، أنظر الشكل (33) الذي يُبيِّن تركيب tRNA.

تحدث عملية الترجمة بمساعدة الرايبوسومات؛ وهي تراكيب تتكوَّن من البروتينات، والحمض النووي الرايبوسومي rRNA. ويتألَّف كل رايبوسوم من وحدتين؛ إحداهما كبيرة، والأُخرى صغيرة، وهما تجتمعان عند بَدْء عملية الترجمة، أنظر الشكل (34).

يحتوي الرايبوسوم الواحد على ثلاثة مواقع مُخصَّصة لارتباط جزيئات tRNA، أنظر الشكل (35)، ويُسمّى أحدها الموقع (P) Peptidyl -tRNA، وهو يرتبط بـ tRNA الحامل لسلسلة عديد الببتيد التي تتكوَّن في أثناء عملية الترجمة. في حين يُسمّى آخر الموقع (A) Aminoacyl - tRNA Site، وهو يرتبط بـ tRNA الذي يحمل الحمض الأميني الذي سيضاف إلى سلسلة عديد الببتيد. أمّا الموقع الثالث فيُسمّى الموقع (E) Exit site، وهو موقع خروج جزيء tRNA الذي يغادر الرايبوسوم فارغًا بعد أنْ يوصِل الحمض الأميني.

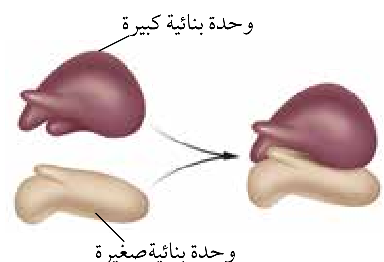
تمرُّ عملية الترجمة بثلاث مراحل رئيسة، هي: مرحلة بَدْء الترجمة، ومرحلة استطالة سلسلة عديد الببتيد، ومرحلة انتهاء الترجمة.

مرحلة بَدْء الترجمة Initiation of Translation

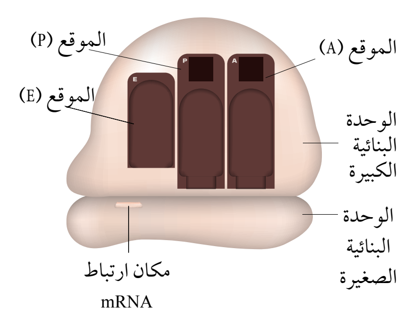
يرتبط جزيء mRNA وجزيء tRNA البادئ (الذي يُمثِّل تسلسل النيوكليوتيدات في موقع الكودون المضاد فيه UAC، ويحمل الحمض الأميني الميثيونين) بالوحدة البنائية الصغيرة، فتتكوَّن روابط هيدروجينية بين كودون البَدْء (AUG) في mRNA والكودون المضاد (UAC) في tRNA، يلي ذلك ارتباط الوحدة البنائية الكبيرة للرايبوسوم.

يُذكَر أنَّ هذه العملية تحتاج إلى عوامل مساعدة، وإلى الطاقة المُخزَّنة في جزيئات غوانوسين ثلاثي الفوسفات GTP، أنظر الشكل (36).

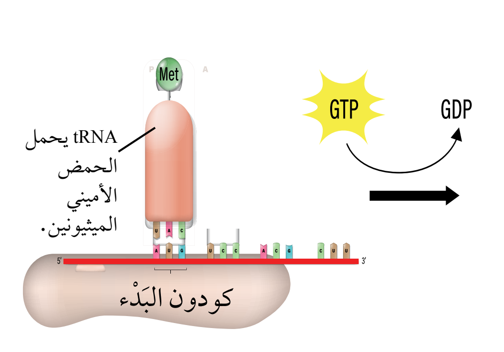
الشكل (33): تركيب tRNA.

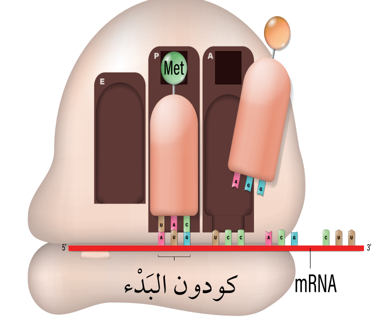


الشكل (34): تركيب الرايبوسوم.

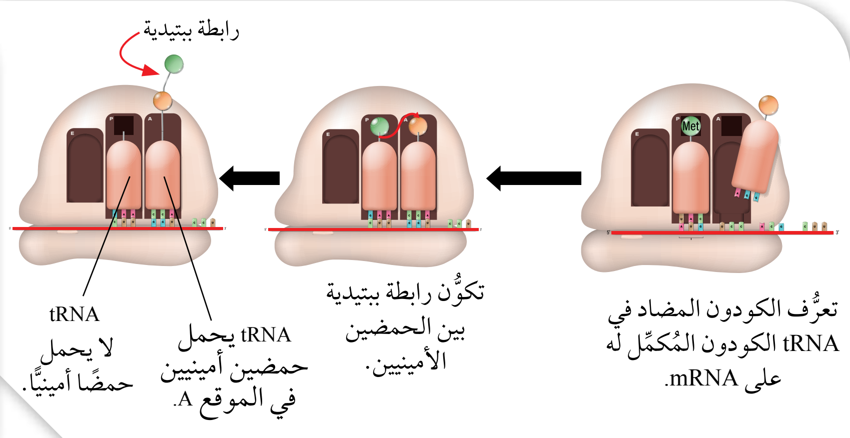


الشكل (35): مواقع ارتباط جزيئات tRNA في الرايبوسوم.

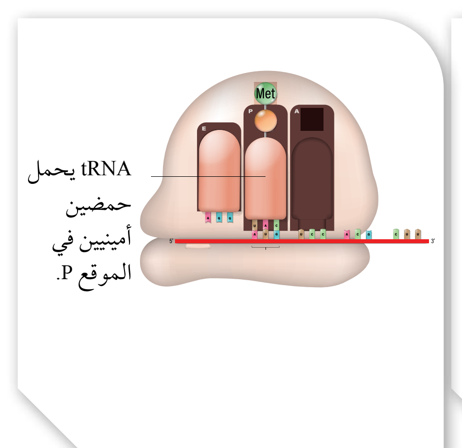




الشكل (36): مرحلة بَدْء الترجمة.



الشكل (37/ أ): بَدْء مرحلة الاستطالة.



الشكل (37/ ب): بَدْء مرحلة الاستطالة.

مرحلة استطالة سلسلة عديد الببتيد Polypeptide Elongation

يستطيع الكودون المضاد في أحد جزيئات tRNA أنْ يتعرَّف الكودون المُكمِّل له في جزي mRNA الموجود في الموقع (A). عندئذٍ، يستقبل الموقع (A) في الرايبوسوم جزيء tRNA الذي يحوي الكودون المضاد المُكمِّل للكودون الثاني في جزيء mRNA، ويحمل الحمض الأميني الثاني، فتتكوَّن رابطة ببتيدية بين مجموعة الكربوكسيل في الحمض الأميني الموجود في الموقع (P) ومجموعة الأمين في الحمض الأميني الذي يحمله جزيء tRNA الموجود في الموقع (A)، وبذلك يكون الموقع (A) في هذه اللحظة مشغولًا بـ tRNA، حاملًا حمضين أمينيين، في حين لا يحمل جزيء tRNA الموجود في الموقع (P) أيَّ حمض أميني، أنظر الشكل (37/ أ).

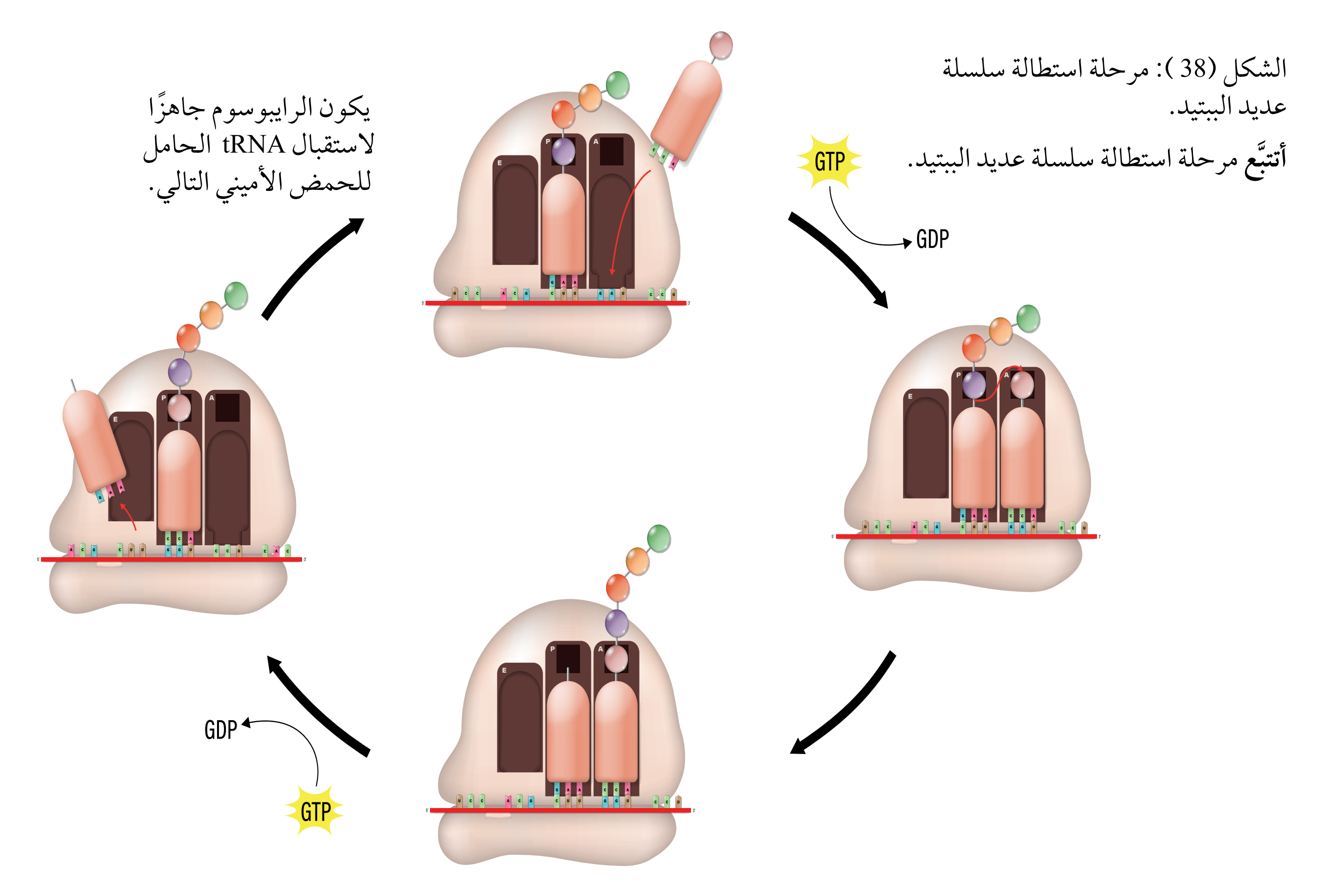
يتحرَّك الرايبوسوم إلى الداخل على سلسلة mRNA بمقدار كودون واحد من النهاية ′5 إلى النهاية ′3؛ ما يؤدّي إلى انتقال جزيء tRNA الموجود في الموقع (P) إلى الموقع (E) خارجًا من الرايبوسوم، وينتقل جزيء tRNA الموجود في الموقع (A) إلى الموقع (P)، فيصبح الموقع (A) فارغًا وجاهزًا لاستقبال جزيء tRNA جديد يحمل كودونًا مضادًّا للكودون التالي في جزيء mRNA، أنظر الشكل (37/ ب).

تتكرَّر الخطوات السابقة لإضافة الحموض الأمينية واحدًا تلو الآخر. وتحتاج مرحلة استطالة سلسلة عديد الببتيد عند إضافة كل حمض أميني إلى الطاقة المُخزَّنة في جزيئات GTP؛ لكي يتمكَّن الكودون المضاد في جزيء tRNA من تعرُّف الكودون في جزي mRNA، وتحريك الرايبوسوم بعد تكوُّن الرابطة الببتيدية، أنظر الشكل (38).

✓ **أتحقَّق:** ما الكودون المضاد في جزيء tRNA البادئ؟

الشكل (38): مرحلة استطالة سلسلة عديد الببتيد.

أتتبَّع مرحلة استطالة سلسلة عديد الببتيد.

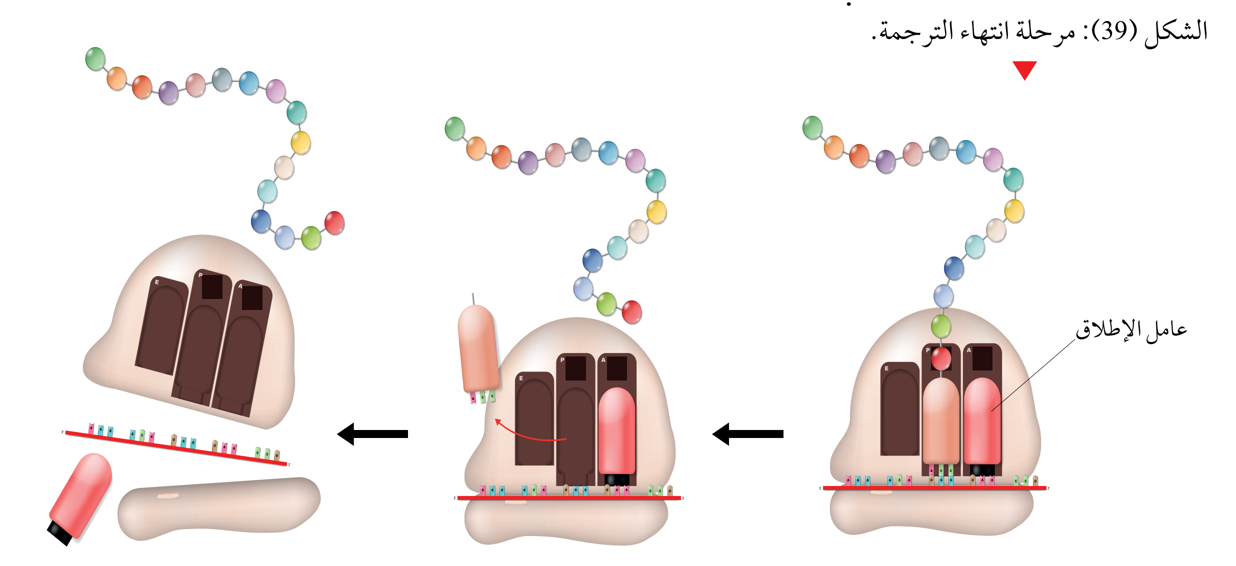


مرحلة انتهاء الترجمة Termination of Translation

عند وصول الرايبوسوم إلى أحد كودونات الوقف: (UAA)، أو (UAG)، أو (UGA) في جزيء mRNA، فإنَّ الموقع (A) في الرايبوسوم يستقبل عامل الإطلاق Release factor عوضًا عن جزيء tRNA، فيعمل هذا العامل على تحلُّل الرابطة بين سلسلة عديد الببتيد المُتكوِّنة وجزيء tRNA الموجود في الموقع (P)؛ ما يؤدّي إلى تحرُّر سلسلة عديد الببتيد من الرايبوسوم، ثم انفصال الوحدة البنائية الكبيرة للرايبوسوم، وانفصال بقية المُكوِّنات، أنظر الشكل (39).

أتحقَّق: ما مبدأ العمل الذي يعتمد عليه عامل الإطلاق؟

الشكل (39): مرحلة انتهاء الترجمة.



التعبير الجيني Gene Expression

تستطيع الخلية تصنيع آلاف البروتينات المختلفة التي تؤدّي كلٌّ منها وظيفة خاصة بها، غير أنَّ الخلية لا تحتاج إلى هذه البروتينات كلها في الوقت نفسه؛ لذا تَعْمَد إلى تنظيم عملية تصنيع البروتينات، لا سيَّما وقت التصنيع، والكمِّية التي تَلزمها، في عملية تُسمّى **التعبير الجيني Gene Expression**؛ وهي عملية تستخدم فيها الخلية المعلومات الوراثية التي يحملها الجين لبناء جزيء RNA، أو تصنيع بروتين يؤدّي وظيفة مُحدَّدة في الخلية.

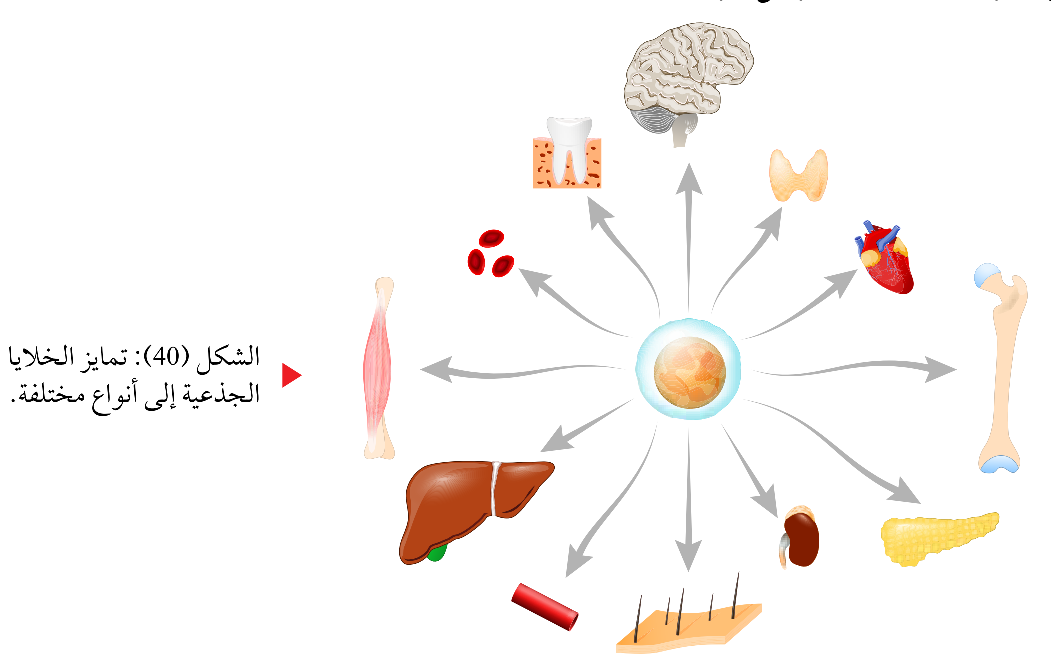
صحيحٌ أنَّ خلايا الكائن الحيِّ عديد الخلايا تحوي كروموسومات تحمل الجينات نفسها، لكنَّ تفعيل التعبير الجيني لجينات مُعيَّنة دون غيرها يُسبِّب اختلاف البروتينات التي تصنعها خلية ما عن تلك التي تصنعها أُخرى، استنادًا إلى الوظيفة التي تؤدّيها كل خلية في الكائن الحيِّ.

يُؤثِّر التعبير الجيني في **تمايز الخلايا Cell Differentiation**. ويُعرَّف التمايز بأنَّه عملية تتحوَّل فيها الخلايا غير المُتخصِّصة إلى خلايا مُتخصِّصة. فمثلًا، في مراحل تكوُّن جنين الإنسان تتمايز الخلايا الناتجة من انقسام الزيجوت إلى خلايا مختلفة الأنواع، منها: خلايا الكبد، والخلايا العصبية، أنظر الشكل (40).

تتطلَّب عملية التمايز هذه تغيير نمط التعبير الجيني في الخلية، فيصبح للخلية نمط مُحدَّد للتعبير الجيني، لا يتغيَّر غالبًا طوال مدَّة حياة الخلية المُتخصِّصة.

يتأثَّر التعبير الجيني في الخلايا بعوامل داخلية (من جسم الكائن الحيِّ نفسه) مثل الهرمونات، وعوامل خارجية (من البيئة المحيطة بالكائن الحيِّ) مثل بعض المواد الكيميائية، وعوامل فيزيائية.

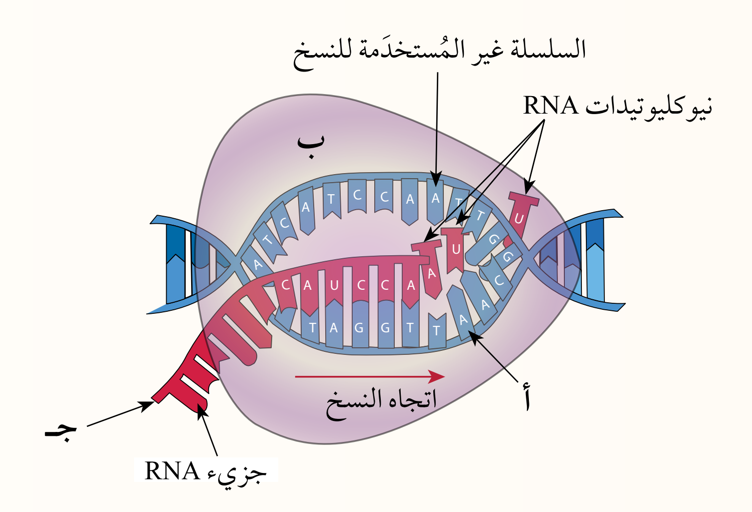
✓ **أتحقَّق:** ما العوامل المُؤثِّرة في عملية التعبير الجيني؟



الشكل (40): تمايز الخلايا الجذعية إلى أنواع مختلفة.

مراجعة الدرس

1. **الفكرة الرئيسة:** فيمَ يستفاد من اختلاف التعبير الجيني بين الخلايا؟
2. ما المقصود بتضاعف DNA شبه المُحافِظ؟
3. **أستنتج:** ماذا سيحدث إذا تعرَّضت خلية ما في أثناء عملية تضاعف DNA إلى عوامل مُثبِّطة للبروتينات المُرتبِطة بالسلاسل المفردة؟
4. **أُفسِّر:** يعمل إنزيم بادئ RNA على إضافة سلسلة البَدْء إلى كل سلسلة من سلسلتي DNA المُكمِّلتين.
5. أدرس الشكل الآتي الذي يُبيِّن إحدى خطوات النسخ في عملية تصنيع البروتين، ثم أُجيب عن الأسئلة التي تليه:



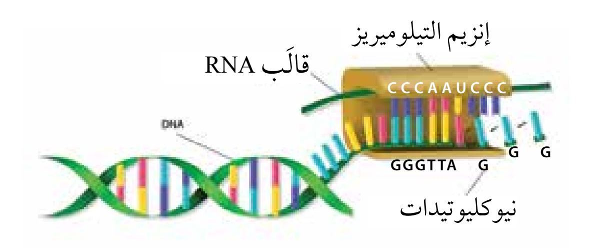
أ- ما الخطوة التي يُبيِّنها الشكل؟

ب- ماذا يُمثِّل كلٌّ من (أ)، و(ب) في الشكل؟

جـ- ما نهاية السلسلة المشار إليها في الشكل بالرمز (جـ)؟

الإثراء والتوسُّع

التيلوميرات Telomeres

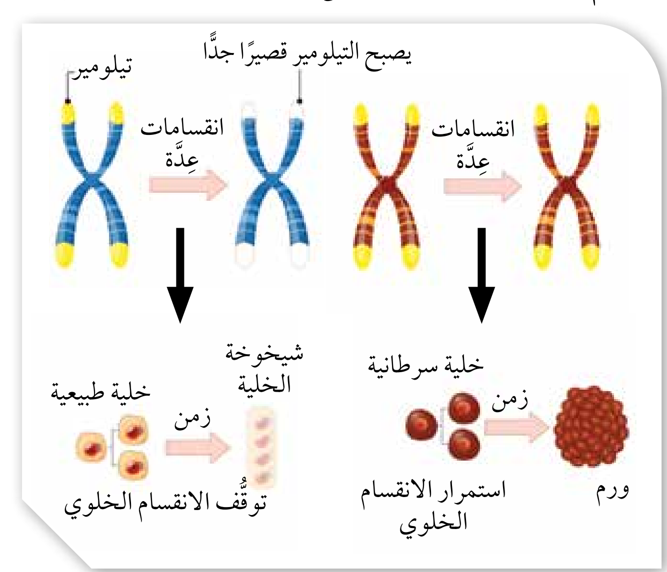


توجد في نهاية كروموسومات الخلايا حقيقية النوى سلاسل مُتكرِّرة من النيوكليوتيدات الطرفية غير مُشفِّرة، تعمل على حماية الجينات في نهايات الكروموسومات من الضياع (الشطب) في أثناء الانقسامات المُتكرِّرة للخلية، وتُعرَف باسم التيلومير Telomere.

تختلف الكائنات الحيَّة حقيقية النوى في ما بينها من حيث عدد النيوكليوتيدات في التيلومير؛ ففي خلايا الإنسان الجسمية - مثلًا- توجد سلسلة من ستة نيوكليوتيدات (5'-TTAGGG-3')، والسلسلة المكملة لها، تتكرَّر عددًا من المَرّات يتراوح بين (100-1000) مَرَّة.

يوجد أيضًا إنزيم يُسمّى التيلوميريز telomerase، ويتكوَّن من مُعقَّد (بروتين - RNA)، ويستخدم RNA الموجود فيه قالبًا لإضافة سلسلة مُتكرِّرة من النيوكليوتيدات إلى نهاية 3′ في الكروموسوم، وهو ينشط في الخلايا الجنينية والخلايا الجسمية الجذعية، ولا ينشط في الخلايا الجسمية الطبيعية المُتمايِزة.

بعد إضافة سلسلة مُتكرِّرة إلى نهاية 3′ في الكروموسوم، يضيف إنزيم بلمرة RNA البادئ سلسلة بَدْء إلى السلسلة المُتكرِّرة، ثم يعمل إنزيم بلمرة DNA على إضافة النيوكليوتيدات المُكمِّلة للسلسلة. تتكرَّر هذه العملية مَرّاتٍ عِدَّةً للحفاظ على طول سلسلة التيلومير، إلّا أنَّه لا يُمكِن لمعظم الخلايا الجسمية القيام بهذه العملية؛ نظرًا إلى عدم وجود إنزيم التيلوميريز فيها، فيقل طول سلسلة التيلومير في ظلِّ الانقسامات الخلوية المُتكرِّرة، وتقل قدرتها على الانقسام؛ ما يؤدّي إلى شيخوخة الخلية أو موتها.



يُذكَر أنَّ إنزيم التيلوميريز يكون نشطًا في الخلايا السرطانية؛ ما يحافظ على طول التيلومير فيها، بالرغم من الانقسامات المُتكرِّرة؛ لذا تستمر الخلايا في الانقسام.

أُصمِّم مَطْوِيَّة تَعرِض دور التيلوميريز في شيخوخة الخلايا.

السؤال الأوَّل:

لكل فقرة من الفقرات الآتية أربع إجابات، واحدة فقط صحيحة، أُحدِّدها:

1. الطور (المرحلة) الذي تكون فيه الكروموسومات مكوَّنة من كروماتيدات شقيقة هو:
أ. G1. ب. G2 . جـ. S. د. M.

2. طور الانقسام المتساوي الذي يبدأ فيه الغلاف النووي بالاختفاء هو:
أ. التمهيدي. ب. الاستوائي.
جـ. الانفصالي. د. النهائي.

3. طور الانقسام المتساوي الذي يبدأ فيه الغلاف النووي بالظهور هو:
أ. التمهيدي. ب. الاستوائي.
جـ. الانفصالي. د. النهائي.

4. طور الانقسام المتساوي الذي تبدأ فيه الخيوط المغزلية الارتباط بالقطع المركزية هو:
أ. التمهيدي. ب. الاستوائي.
جـ. الانفصالي. د. النهائي.

5. الإنزيم الذي يُمكِنه تنقيح DNA في أثناء عملية التضاعف هو:
أ. إنزيم بلمرة DNA.
ب. إنزيم بلمرة RNA.
جـ. إنزيم الهيليكيز.
د. البروتين المُرتبِط بالسلاسل المفردة.

6. يكون الكودون المضاد في جزيء tRNA:
أ. مُكمِّلًا للكودون في جزيء DNA.
ب. مُطابِقًا للكودون في جزيء mRNA.
جـ. مُكمِّلًا للكودون في جزيء mRNA.
د. مُتماثِلًا لجميع الحموض الأمينية.

7. عدد مواقع ارتباط tRNA في الرايبوسوم هو:
أ. 1 ب. 2 جـ. 3 د. 4

8. للانقسام المتساوي أهمية مباشرة في كلٍّ ممّا يأتي **باستثناء**:
أ. النمو.
ب. التكاثر اللاجنسي.
جـ. تعويض الأنسجة التالفة.
د. إنتاج الجاميتات.

9. الإنزيم الذي يفصل سلسلتي DNA هو إنزيم:
أ. الربط. ب. بلمرة DNA.
جـ. الهيليكيز. د. بادئ RNA.

10. ينتج من تضاعف جزيء DNA جزيئان، يتكوَّن كلٌّ منهما من:
أ. سلسلتين جديدتين.
ب. سلسلتين؛ إحداهما جديدة، والأُخرى أصلية.
جـ. سلسلتين أصليتين.
د. سلسلتين، كلٌّ منهما تحوي أجزاء جديدة، وأُخرى أصلية.

11. تحدث عملية تضاعف DNA في الخلايا حقيقية النوى في:
أ. السيتوبلازم. ب. الرايبوسوم.
جـ. النواة. د. الشبكة الإندوبلازمية.

12. الإنزيم الذي يضيف النيوكليوتيدات المُكمِّلة لنيوكليوتيدات السلسلة الأصلية في أثناء تضاعف DNA هو إنزيم:
أ. بلمرة RNA. ب. بلمرة DNA.
جـ. الهيليكيز. د. النيوكليز.

13. الروابط التي يُحطِّمها إنزيم الهيليكيز بين سلسلتي DNA هي:
أ. الببتيدية. ب. الأيونية.
جـ. التساهمية. د. الهيدروجينية.

14. إحدى الآتية صحيحة في ما يتعلَّق بالحمض النووي RNA:
أ. يتكوَّن نتيجة تضاعف DNA.
ب. يتكوَّن من سلسلتين لولبيتين تلتفُّ إحداهما على الأُخرى في الخلايا حقيقية النوى.
جـ. تدخل في تركيبه قاعدة نيتروجينية هي الثايمين.
د. ينتج من عملية النسخ.

15. بعد استخدام الحمض الأميني في أثناء تصنيع البروتين، فإنَّ جزيء tRNA:
أ. ينطلق مَرَّةً أُخرى، فيرتبط بحمض أميني آخر مناسبٍ للكودون المضاد الذي يحمله.
ب. يُحطَّم مباشرةً.
جـ. يعود إلى النواة، ولا يغادرها.
د. يرتبط بأوَّل حمض أميني يقابله.

16. جميع الآتية صحيحة في ما يتعلَّق بعملية النسخ **باستثناء**:
أ. عدم نسخ جزيء DNA كاملًا، واقتصار العملية على نسخ جينات مُعيَّنة فقط.
ب. استخدام سلسلة واحدة فقط من DNA في عملية النسخ.
جـ. أداء إنزيم بلمرة DNA دورًا في عملية النسخ.
د. اتجاه بناء سلسلة mRNA هو من $5'$ إلى $3'$.

17. يعمل إنزيم بلمرة DNA على:
أ. ربط قطع أوكازاكي بعضها ببعض.
ب. ربط النيوكليوتيدات بعضها ببعض في أثناء التضاعف.
جـ. فكُّ التفاف السلاسل في DNA.
د. إنتاج جزيء RNA أوَّلي.

18. تُكوِّن قطعُ أوكازاكي:
أ. السلسلة المُتأخِّرة.
ب. السلسلة الرائدة.
جـ. جزيء RNA الأوَّلي.
د. سلسلتي DNA.

19. اتجاه استطالة جزيء RNA خلال عملية النسخ هو:
أ. $3'$ إلى $5'$.
ب. $5'$ إلى $3'$.
جـ. $3'$ إلى $3'$.
د. $5'$ إلى $5'$.

20. اتجاة بناء سلسلة DNA هو:
أ. $3'$ إلى $5'$.
ب. $5'$ إلى $3'$.
جـ. $3'$ إلى $3'$.
د. $5'$ إلى $5'$.

السؤال الثاني:

أملأ الفراغ في الجدول الآتي بالعدد المُناسِب لكلٍّ من التراكيب الواردة فيه، لخلية جسمية في الزرافة، علمًا بأنَّ كل خلية جسمية تحوي 30 كروموسومًا:

	طور النمو الأوَّل	طور النمو الثاني	الطور التمهيدي
عدد الكروماتيدات الشقيقة:			
الأجسام المركزية:			
المُريكِزات:			

السؤال الثالث:

أُوضِّح مرحلة الاستطالة في عملية تصنيع البروتين.

السؤال الرابع:

أُقارِن بين كلٍّ ممّا يأتي:

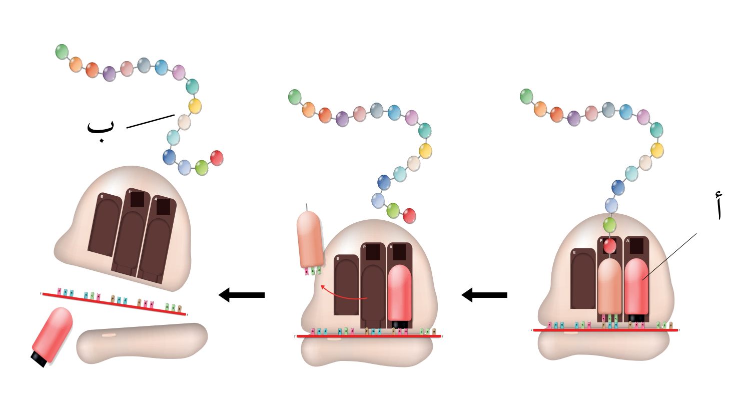
أ- آليَّة التنقيح، وآليَّة تصحيح استئصال النيوكليوتيد من حيث الإنزيمات التي تشترك في كلٍّ منهما.

ب- جزيء mRNA الأوَّلي، وجزيء mRNA الناضج من حيث وجود الإنترونات، ووجود الإكسونات.

السؤال الخامس:

مُعتمِدًا الشكل المجاور، أُجيب عن السؤالين الآتيين:

1. أيُّ مراحل تصنيع البروتينات يُمثِّلها الشكل؟
2. إلامَ يرمز كلٌّ من (أ)، و(ب)؟



السؤال السادس:

أُوضِّح أهمية tRNA في تصنيع البروتينات.

السؤال السابع:

أتتبَّع آليَّة تصحيح اختلالات DNA باستئصال النيوكليوتيد.

السؤال الثامن:

أُوضِّح آليَّة بَدْء عملية الترجمة.

السؤال التاسع:

أضع إشارة (✓) أو إشارة (✗) إزاء كل عبارة في جدول المقارنة الآتي بين السلسلة الرائدة والسلسلة المُتأخِّرة:

	السلسلة الرائدة	السلسلة المُتأخِّرة
استخدام النيوكليوتيدات الحُرَّة.		
استمرار عملية البناء على نحوٍ مُتواصِل.		
الحاجة إلى إنزيم بلمرة DNA.		
الحاجة إلى إنزيم ربط DNA أكثر من مَرَّة.		
اتجاه البناء من ′5 إلى ′3.		

السؤال العاشر:

أتأمَّل في ما يأتي سلسلة mRNA الناضج، ثم أُجيب عن السؤالين التاليين:

A U G G U U A G C U A G A U G A C G G C U C C G

1. ما عدد الحموض الأمينية في سلسلة عديد الببتيد الناتجة من ترجمة سلسلة mRNA؟
2. ما عدد جزيئات tRNA التي يُمكِن استخدامها في ترجمة هذه السلسلة؟

السؤال الحادي عشر:

أُقارِن بين تضاعف DNA ونسخ RNA كما في الجدول الآتي:

	تضاعف DNA	نسخ RNA
الإنزيمات المُستخدَمة في بناء السلسلة.		
عدد سلاسل DNA المُستخدَمة.		
حدوث التصحيح الذاتي في أثناء العملية.		

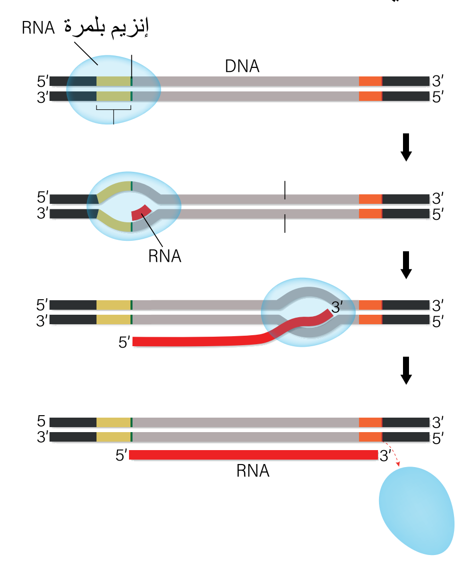
السؤال الثاني عشر:

أَصِل بين المصطلح العلمي والوصف المُناسِب له في ما يأتي:

الكودون المضاد	يحمل المعلومات الوراثية من النواة إلى السيتوبلازم.
الرايبوسوم	عملية فكِّ شيفرة mRNA، وتصنيع البروتين.
تضاعف DNA	ثلاث قواعد تكون في إحدى نهايات tRNA .
الكودون	تصنيع mRNA باستعمال إنزيم بلمرة RNA في النواة.
النسخ	ثلاث قواعد تُحدِّد الحمض الأميني الذي سيُستخدَم في أثناء عملية الترجمة.
الترجمة	تحدث فيه عملية الترجمة.
mRNA	يصنع DNA نسخة عن نفسه.

السؤال الثالث عشر:

أُوضِّح أيَّ مراحل تصنيع البروتين الرئيسة التي يُمثِّلها الشكل الآتي، مُبيِّنًا خطواتها.



السؤال الرابع عشر:

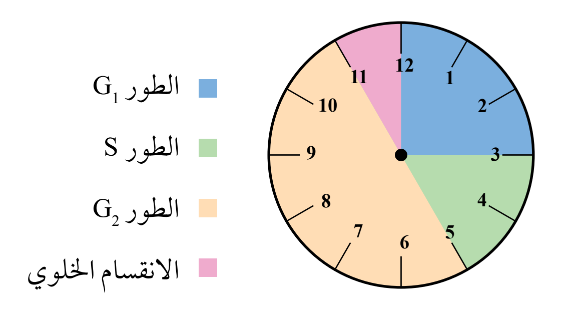
أُنشِئ جدولًا للمقارنة بين الانقسام المتساوي والانقسام المُنصِّف من حيث: الأهمية، وعدد الخلايا الناتجة، ونوع الخلايا التي يحدث فيها الانقسام، وعدد الكروموسومات في الخلايا الناتجة مقارنة بالخلية المُنقسِمة.

السؤال الخامس عشر:

أتوقَّع: إذا حدثت عملية العبور أكثر من مَرَّة خلال الانقسام الواحد، وفي مواقع مختلفة من الكروموسوم نفسه، فما تأثير ذلك في التنوُّع الجيني للكائنات الحيَّة؟

السؤال السادس عشر:

أدرس الشكل المجاور الذي يُبيِّن دورة خلية يستغرق إكمالها 12 ساعة، ثم أُجيب عن الأسئلة الآتية:



1. ما الطور الذي ستكون فيه الخلية الساعة 6:30؟
2. **أحسُبُ** عدد الدقائق اللازمة لتضاعف DNA.
3. **أتوقَّع:** في أيِّ طور ستكون الخلية بعد 7 ساعات من الساعة 9؟
4. في أيِّ وقت تقريبًا ستحدث عملية الانقسام الخلوي؟
5. في أيِّ وقت / أوقات ستُضاعِف الخلية عُضَيّاتها؟

السؤال السابع عشر:

أُفسِّر: تتوقَّف عملية الانقسام إذا لم ترتبط الخيوط المغزلية على نحوٍ مُناسِب بالقطع المركزية.

السؤال الثامن عشر:

أُوضِّح المقصود بكلٍّ من السايكلينات، وإنزيمات الفسفرة المُعتمِدة على السايكلين، مُبيِّنًا دور كُلٍّ منهما في تنظيم دورة الخلية.

مسرد المصطلحات

(أ)

الأسـموزية الكيميائيـة Chemiosmosis: عـودة البروتونـات H^+ نتيجـة فـرق التركيـز عـلى جانبـي الغشـاء الخلـوي عـن طريـق إنزيـم إنتـاج ATP.

إشارات التقدُّم Go-ahead Signals: إشارات تُحفِّز انتقال الخلية إلى المرحلة اللاحقة أو الطور اللاحق.

إشـارات التوقُّـف Stop Signals: إشـارات تعمـل عـلى بقـاء الخليـة في الطـور أو المرحلـة، وعـدم انتقالهـا إلى المرحلـة التاليـة أو الطـور الـذي يليـه.

الإشـارات الخلويـة Cellular Signals: مجموعـة مـن المـواد الكيميائيـة التـي معظمهـا بروتينـات، وهـي تُصنَّـف بحسـب مصدرهـا إلى إشـارات داخليـة، وإشـارات خارجيـة.

إشـارات المـوت المُبرمَـج للخليـة Apoptosis Signals: إشـارات تعمـل عـلى تنشـيط جينـات تُسـهِم في إنتـاج إنزيمات تُحطِّـم مُكوِّنـات في الخليـة؛ مـا يـؤدّي إلى موتها.

إنزيـم ربـط DNA Ligase DNA: إنزيـم يربـط قطـع DNA بأُخـرى مجـاورة عـن طريـق تكويـن روابـط فوسـفاتية ثنائيـة إسـترية بـين النيوكليوتيـدات؛ وهـو الإنزيـم الـذي يربـط قطـع أوكازاكـي بعضهـا ببعـض.

إنزيـمات الفسـفرة المُعتمِـدة عـلى السـايكلين Cyclin-Dependent Kinases Cdks: إنزيـمات تعمـل -بعـد ارتباطهـا بالسـايكلين- عـلى إضافـة مجموعـة فوسـفات إلى البروتـين الهـدف في عمليـة تُسـمّى الفسـفرة. وقـد تـؤدّي فسـفرة البروتينـات إلى تحفيزهـا أو تثبيطهـا بحسـب حاجـة الخليـة.

الانقسـام المُنصِّـف Meiosis: أحـد أنـواع الانقسـام الخلـوي الـذي يمـرُّ بمرحلتـين أساسـيتين، ويـؤدّي إلى إنتـاج الجاميتـات؛ وهـي خلايـا أُحاديـة المجموعـة الكروموسـومية.

انقسـام النـواة Karyokinesis: انقسـام نـواة الخليـة إلى نواتـين مُتماثِلتـين، وهـو مـا يحـدث عـلى نحـوٍ مُشـابِهٍ في جميـع الخلايـا حقيقيـة النـوى.

(ب)

البروتينـات المُرتبِطـة بالسلاسـل المفـردة Single Strand Binding Proteins (SSBP): بروتينـات تمنـع إعـادة ارتباط السلسـلتين إحداهمـا بالأُخـرى مَـرَّةً ثانيـةً بعـد فصلهـا عـن طريـق إنزيـم الهيليكيـز.

البنـاء الكيميائـي Chemosynthesis: إنتـاج بعـض الكائنـات الحيَّـة الدقيقـة اللاهوائيـة مـواد عضويـة باسـتخدام المـواد التـي تتأكسـد بسـهولة، بوصفهـا مصـدرًا للإلكترونـات مثـل H_2S، بـدلًا مـن المـاء.

(ت)

التجدُّد Regeneration: تعويض بعض الكائنات الحيَّة عديدة الخلايا أجزاءً فَقَدَتْها من أجسامها عن طريق الانقسام المتساوي.

التحلُّل الغلايكولي Glycolysis: المرحلة الأولى من التنفُّس الخلوي؛ وهو سلسلة من التفاعلات الكيميائية التي تحدث في السيتوسول، ولا تحتاج إلى أكسجين.

التخمُّر Fermentation: عملية تحدث في السيتوسول عند عدم توافر كمِّيات كافية من الأكسجين. وهو يُصنَّف إلى أنواع عِدَّة بحسب ناتجه النهائي، منها: تخمُّر حمض اللاكتيك، والتخمُّر الكحولي.

الترجمة Translation: عملية تحدث في السيتوسول عن طريق الرايبوسوم، وتُستخدَم فيها المعلومات الوراثية التي يحملها mRNA لبناء سلسلة عديد الببتيد.

تضاعف DNA Replication DNA: عملية تُنظِّمها إنزيمات عِدَّة، وفيها تنتج نسختان مُتماثِلتان من DNA لكل جزيء DNA تحدث له هذه العملية.

التضاعف شبه المُحافِظ Semiconservative Replication: تضاعف جزيء DNA، بحيث يحوي كل جزيء سلسلتين؛ إحداهما من DNA الأصل (أيْ سلسلة أصلية)، والأُخرى جديدة ومُكمِّلة لها.

التعبير الجيني Gene Expression: عملية تستخدم فيها الخلية المعلومات الوراثية التي يحملها الجين لبناء جزيء RNA، أو تصنيع بروتين يؤدّي وظيفة مُحدَّدة في الخلية.

التفاعلات الضوئية Light Reactions: تفاعلات تحتاج إلى الضوء، وتحدث في أغشية الثايلاكويدات.

تمايز الخلايا Cell Differentiation: عملية تتحوَّل فيها الخلايا غير المُتخصِّصة إلى خلايا مُتخصِّصة.

التيلوميرات Telomeres: سلاسل مُتكرِّرة من النيوكليوتيدات الطرفية، تعمل على حماية الجينات الطرفية في الكروموسومات من الضياع (الشطب) في أثناء الانقسامات المُتكرِّرة، وتوجد في نهاية كروموسومات الخلايا حقيقية النوى.

التيلوميريز Telomerase: إنزيم يتكوَّن من مُعقَّد بروتين –RNA، ويُستخدَم RNA الموجود فيه قالبًا لإضافة النيوكليوتيدات إلى نهاية ′3 في الكروموسوم.

(ح)

حلقة كالفن Calvin Cycle: تفاعلات لا تحتاج إلى ضوء، وتحدث في اللُّحْمة داخل البلاستيدة الخضراء.

حلقة كربس Krebs Cycle: الخطوة الثانية من عملية التنفُّس الهوائي، وهي تحدث في الحشوة داخل الميتوكندريا، وتُسمّى أيضًا حلقة حمض الستريك Citric Acid Cycle.

(د)

الدهـون الثلاثيـة Triglycerides: أحـد أنـواع الليبيـدات. وهـي تتكـوَّن مـن اتحـاد جـزيء واحـد مـن الغليسرول مـع ثلاثـة جزيئـات مـن الحمـوض الدهنيـة بروابـط تسـاهمية إسـترية.

دورة الخليـة Cell Cycle: دورة تبـدأ منـذ تكـوُّن الخليـة نتيجـة انقسـام خليـة مـا، وتنتهـي بانقسـامها هـي نفسـها، وإنتـاج خليتـين جديدتـين.

(ر)

الرابطـة الفوسـفاتية ثنائيـة الإسـتر Phosphodiester Bond: رابطـة تربـط النيوكليوتيـدات بعضهـا ببعـض داخـل السلسـلة الواحـدة في الحمـض النـووي.

(س)

السـايكلينات Cyclins: مجموعـة مـن البروتينـات، توجـد في معظـم الخلايـا حقيقيـة النـوى، وتُصنَّـع في أثنـاء دورة الخليـة، وتُحطَّـم خلالهـا سريعًـا. وهـي تُصنَّـف إلى أربعـة أنـواع رئيسـة، تـؤدّي دورًا في تنظيـم دورة الخليـة؛ بتحفيزهـا إنزيـمات الفسـفرة المُعتمِـدة عـلى السـايكلين.

السـتيرويدات Steroids: أحـد أنـواع الليبيـدات. وهـي تتكـوَّن مـن أربـع حلقـات كربونيـة مُلتحِمـة؛ ثـلاث منهـا سداسـية، وواحـدة خماسـية، إضافـةً إلى مجموعـة كيميائيـة ترتبـط بالحلقـة الرابعـة، وتختلـف مـن سـتيرويد إلى آخـر.

السُّـكَّريات الأُحاديـة Monosaccharides: أبسـط أنـواع الكربوهيـدرات، وصيغتهـا العامـة هـي $(CH_2O)n$، حيـث n عـدد ذَرّات الكربـون في السُّـكَّر الأُحـادي.

السُّـكَّريات الثنائيـة Disaccharides: سُـكَّريات يتكـوَّن كلٌّ منهـا مـن وحدتـين مـن السُّـكَّريات الأُحاديـة، ترتبطـان معًـا برابطـة تسـاهمية غلايكوسـيدية.

السُّـكَّريات المُتعـدِّدة Polysaccharides: : مُبلمـرات تتكـوَّن مـن سُـكَّريات أحاديـة (أو مشـتقاتها) ترتبـط في مـا بينهـا بروابط تسـاهمية غلايكوسـيدية.

(ط)

طاقة التنشيط Activation Energy: الطاقة اللازمة لبَدْء التفاعل الكيميائي.

طـور التضاعـف (Synthesis) (S) Phase: طـور يتضاعـف فيـه DNA، وتحـوي نـواة الخليـة في نهايتـه مثـلي كمِّيـة المـادة الوراثيـة.

طـور النمـو الأوَّل (G1) Phase: أوَّل أطـوار دورة الخليـة. وفيـه تنمـو الخليـة، ويـزداد كلٌّ مـن حجمهـا وعـدد العُضَيّـات فيهـا، فضـلًا عـن أدائهـا (الخليـة) أنشـطتها ووظائفهـا الخلويـة الطبيعيـة.

طـور النمـو الثـاني (G2) Phase: طـور يسـتمر فيـه نمـو الخليـة، فيـزداد حجمهـا، فضـلًا عـن أدائهـا أنشـطتها ووظائفهـا الخلويـة الطبيعيـة، إلى جانـب اسـتعدادها للانقسـام؛ إذ تبـدأ بإنتـاج البروتينـات التـي تُصنَّـع منهـا الخيـوط المغزليـة (الأُنَيْبيبـات الدقيقـة).

(ع)

العبـور Crossing Over: عمليـة تبـادل أجـزاء مـن المـادة الوراثيـة بـين كروماتيديـن غـير شـقيقين في كروموسـومين متماثلـين.

(ف)

الفسـفرة التأكسـدية Oxidative Phosphorylation: عمليـة إنتـاج ATP عـن طريـق سلسـلة نقـل الإلكـترون، والأسـموزية الكيميائيـة، وهـي تتضمَّـن تفاعـلات أكسـدة واختـزال.

(ل)

الليبيـدات المُفسـفَرة Phospholipids: أحـد أنـواع الليبيـدات. وهـي تتكـوَّن مـن جـزيء غليسـرول يرتبـط بمجموعة فوسـفات، وبجزيئـين مـن الحمـوض الدهنية.

(م)

مُرافِـق الإنزيـم Coenzyme: عوامـل عضويـة مسـاعدة للإنزيـمات، بعضهـا تـؤدّي دورًا في تفاعـلات الأكسـدة والاختـزال التـي تحـدث في الخليـة، مثـل: NAD^+ و FAD المُسـتخدَمة في عمليـة التنفُّـس الخلـوي، و $NADP^+$ المُسـتخدَمة في عمليـة البنـاء الضوئـي.

المرحلـة البينيـة Interphase: مرحلـة تُمثِّـل غالبًـا مـا نسـبته 90% مـن دورة الخليـة، وتنمـو في أثنائهـا الخليـة، ويتضاعـف فيهـا عـدد الكروموسـومات تمهيـدًا للانقسـام الخلـوي.

المُركَّبـات العضويـة الحيويـة Bioorganic Compounds: مُركَّبـات كيميائيـة توجـد في أجسـام الكائنـات الحيَّـة، ويدخـل في تركيبهـا بصـورة أساسـية ذَرّات الكربـون والهيدروجـين، ويدخـل في تركيـب بعضهـا أيضًـا ذَرّات عنـاصر أُخـرى، مثـل: النيتروجـين، والأكسـجين.

مُعقَّـد الإنزيـم- المـادة المُتفاعِلـة Enzyme- Substrate Complex: مُركَّـب يتكـوَّن مـن ارتبـاط المـادة المُتفاعِلـة بالموقـع النشـط في الإنزيـم.

منطقة التصالب Chiasma: نقطة حدوث تقاطع بين كروماتيدين غير شقيقين في كروموسومين متماثلين.

الموقـع النشـط Active Site: تجويـف يتكـوَّن مـن حمـوض أمينيـة مُعيَّنـة، ويُمثِّـل مـكان حـدوث التفاعـل، ويعمـل قالَبًـا ترتبـط بـه المـادة التـي يُؤثِّـر فيهـا الإنزيـم.

(ن)

النسخ Transcription: عملية تحدث في النواة، وتتضمَّن إنتاج جزيء RNA مُكمِّل لجزء من إحدى سلسلتي DNA باستعمال إنزيمات بلمرة RNA وعوامل النسخ المختلفة.

النظام الضوئي Photosystem: نظام أصباغ يوجد في أغشية الثايلاكويدات، وهو يتكوّن من معقّد مركز تفاعل الذي يحتوي على زوج خاص من الكلوروفيل أ، ومُستقبِل إلكترون أوّلي. ويحاط معقّد مركز التفاعل بأصباغ أُخرى، مثل: الكلوروفيل ب، والكاروتين.

نقاط المُراقَبة Checkpoints: نقاط مُحدَّدة في دورة الخلية تُنظِّم فيها الدورة. وتوجد نقاط مُراقَبة عديدة، ولكنَّ نقاط المُراقَبة: G1، و G2، و M هي الرئيسة منها.

1. Pierce B., **Genetics A Conceptual Approach**, 7^{th} edition, Macmillan Learning, 2020.
2. Anberts B., and others., **ESSENTIAL CELL BIOLOGY**, 4^{th} edition, Garland Science, Taylor & Francis Group, LLC,2014.
3. Snustad P. and Simmons M., **Principles of Genetics**, 7^{th} edition, Wiley & Sons, Inc., 2016.
4. Geoffrey M. Cooper., **The Cell A Molecular approach**, 8^{th} edition, Oxford University Press, 2019.
5. Iwasa J. and Marshel W., KARP'S, **CELL AND MOLECULAR BIOLOGY CONCEPTS AND EXPERIMENTS,** 8^{th} edition, Wiley & Sons, Inc., 2016.
6. Martindill,D., and others., **Cambridge International AS & A Level Biology**, Student's Book Collins, 2020.
7. Miller K. and Levine J., **biology**, Pearson. 2012.
8. Pollard T.D., and others., **CELL BIOLOGY,** 3^{rd} edition, Elsevier, Inc., 2017.
9. Urry L. and others., **Biology**, 12^{th} edition, Pearson education, INC., Boston, MASS., USA, 2021

المواقع الإلكترونية:

1. https://insights.globalspec.com/article/13728/papaya-enzyme-makes-for-an-organic-solar-cell
2. .https://www.caltech.edu/about/news/artificial-leaf-harnesses-sunlight-efficient-fuel-production-47635
3. .https://www.researchgate.net/publication/280491078_Artificial_photosynthesis_for_the_conversion_of_sunlight_to_fuel
4. https://phys.org/news/2021-08-artificial-photosynthesis-technology-emerging.html
5. https://www.bnl.gov/chemistry/AP/research.php
6. https://www.scientificamerican.com/article/electricity-carrying-bacteria-lead-to-new-applications-and-new-questions/
7. https://www.quantamagazine.org/electron-eating-microbes-found-in-odd-places-20160621/
8. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31278989/
9. https://www.jstage.jst.go.jp/article/fishsci1994/69/3/69_3_644/_pdf
10. https://web.uri.edu/wetherbee/biochemical-and-physiological-adaptations-to-depth-in-deep-sea-sharks/
11. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/3042201/
12. https://blogs.cornell.edu/cibt/labs-activities/labs/elodea/


تم بحمد الله تعالى

Collins